

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Tihomir Tomić**

Zagreb, 2013.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan

Student:

Tihomir Tomić

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tihomir Tomić**

Mat. br.: 0035163215

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Solarna elektrana s organskim Rankinovim ciklusom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ORC solar power plant**

Opis zadatka:

Kod iskorištavanja sunčeve energije kao obnovljivog energetskog izvora najveći problem predstavlja intermitencija sunčevog zračenja, ponajprije s obzirom na predvidljivu izmjenu dana i noći, ali i s obzirom na stohastičku prirodu lokalne naoblake. Stoga je za kontinuiranu proizvodnju električne energije u takvom postrojenju potrebno imati toplinski spremnik koji će nadomještati potrebnu toplinu u trenucima kad je sunčevo zračenje manje od potrebnog.

U radu je potrebno:

1. Prikupiti podatke o satnim iznosima sunčevog zračenja za izabranu lokaciju u RH.
2. Napraviti matematički model solarne elektrane s organskim Rankinovim ciklusom (ORC) te izabrati prikladan organski radni medij s obzirom na moguću temperaturu svježeg pare.
3. Provesti satnu simulaciju rada elektrane kroz godinu dana.
4. Odrediti potrebne veličine toplinskog spremnika s obzirom na njegovu funkciju (dnevni, tjedni, sezonski).

Svi potrebni ulazni podaci za proračun nalaze se kod mentora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

15. travnja 2013.

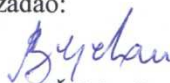
Rok predaje rada:

1. rok: 11. srpnja 2013.  
2. rok: 13. rujna 2013.

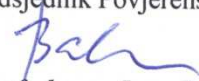
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 15. - 17. srpnja 2013.  
2. rok: 18. - 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Željko Bogdan

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, služeći se znanjem stečenim tijekom studija i koristeći navedenu literaturu.



---

Tihomir Tomić

## ZAHVALE

Zahvaljujem svom mentoru prof.dr.sc. Željku Bogdanu i dr.sc. Mislavu Čehilu na pruženoj pomoći, korisnim savjetima i informacijama potrebnim za izradu ovoga rada. Također zahvaljujem i svim ostalim svojim nastavnicima na pruženom znanju tokom školovanja i temeljima za moj daljnji akademski i stručni napredak.

## SAŽETAK

U ovome radu dan je presjek tehnologija za dobivanje električne energije iz solarne energije s fokusom na solarne termoelektrane s paraboličnim kolektorima te su pobliže opisani dijelovi takvog postrojenja kao i objašnjen način rada.

U drugome dijelu rada iznesena je usporedba organskog Rankinovog ciklusa s parnim Rankinovim ciklusom što je važno za razumjeti prilikom izvođenja matematičkog modela solarne elektrane s organskim Rankinovim ciklusom što je i temelj ovoga rada. Matematički model opisan u ovome radu prikazuje matematički okvir solarne elektrane s kontinuiranom, i što konstantnijom, proizvodnjom električne energije što je postignuto uporabom toplinskog spremnika. Na temelju tog matematičkog modela izveden je izbor radnog medija ORC-a te je pomoću njega provedena satna simulacija rada elektrane kroz godinu dana.

U posljednjem dijelu rada, iz podataka dobivenih simulacijom, određene su potrebne veličine dnevnog toplinskog spremnika za model bez uporabe i s uporabom podataka dobivenih kratkoročnom prognozom vremena, a prilagodbom matematičkog modela određene su i potrebne veličine tjednih i sezonskih toplinskih spremnika. Na kraju ovog rada je dana usporeba podataka dobivenih ovim simulacijama.

# I. SADRŽAJ

ZAHVALE .....	5
SAŽETAK .....	6
I. SADRŽAJ .....	7
II. POPIS SLIKA.....	9
III. POPIS TABLICA .....	11
IV. POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA.....	12
1. UVOD .....	15
2. UKRATKO O SOLARNIM ELEKTRANAMA .....	16
2.1. Solarne termoelektrane .....	16
2.1.1. Elektrane bez koncentriranja sunčevog zračenja .....	16
2.1.2. Elektrane s koncentriranjem sunčevog zračenja .....	18
3. SOLARNE ELEKTRANE S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA.....	23
3.1. Dijelovi solarnih elektrana paraboličnim kolektorima .....	23
3.1.1. Kolektori i apsorberske cijevi.....	24
3.1.2. Primarni krug za prijenos topline .....	27
3.1.3. Energetski blok.....	28
4. SOLARNA ENERGIJA .....	29
5. SOLARNA ELEKTRANA S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA I ORGANSKIM RANKINOVIM CIKLUSOM .....	32
5.1. Primarni krug .....	33
5.1.1. Medij primarnog kruga .....	34
5.2. Sekundarni krug .....	36
5.2.1. Medij sekundarnog kruga.....	38
5.2.2. Usporedba organskog Rankinovog ciklusa s parnim Rankinovým ciklusom ..	40

6. MATEMATIČKI MODEL .....	45
6.1. Određeni ulazni parametri .....	46
6.2. Matematički model primarnog kruga .....	46
6.3. Matematički model sekundarnog kruga.....	53
6.3.1. <i>Algoritam</i> .....	54
7. IZBOR MEDIJA SEKUNDARNOG KRUGA.....	58
8. SIMULACIJE RADA ELEKTRANE.....	59
8.1. Satna simulacija rada solarne elektrane.....	59
8.2. Uporaba kratkotrajne prognoze .....	65
9. ODREĐIVANJE POTREBNIH VELIČINA TOPLINSKIH SPREMNIKA.....	68
9.1. Određivanje potrebne veličine dnevnog spremnika.....	68
9.2. Tjedni spremnik.....	69
9.2.1. <i>Određivanje potrebne veličine tjednog spremnika</i> .....	69
9.2.1. <i>Izlazna električna snaga za model s tjednim toplinskim spremnikom</i> .....	70
9.3. Sezonski spremnik .....	71
10. ZAKLJUČAK .....	74
VI. POPIS LITERATURE.....	77



## II. POPIS SLIKA

SLIKA 1. PRIKAZ RADA SOLARNOG DIMNJAKA [1] .....	17
SLIKA 2. PRIKAZ RADA ELEKTRANE SA SOLARNIM JEZEROM [1] .....	17
SLIKA 3. PRINCIP RADA SOLARNE TERMoeLEKTRANE SA SOLARNIM TORNJEM [2] .....	19
SLIKA 4. T-S DIJAGRAM RADA STIRLINGOVOG TOPLINSKOG MOTORA [1] .....	20
SLIKA 5. DIJELOVI SOLARNE TERMoeLEKTRANE S SOLARNIM TANJUROM I STIRLINGOVIM TOPLINSKIM MOTOROM [1] .....	21
SLIKA 6. NAČIN FOKUSIRANJA SUNČEVE SVIJETLOSTI KOD FRESNEL KOLEKTORA [3] .....	22
SLIKA 7. GLAVNI DIJELOVI SOLARNE ELEKTRANE S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA [5] .....	24
SLIKA 8. DIJELOVI PARABOLIČNOG KOLEKTORA NA PRIMJERU PARABOLIČNOG KOLEKTORA S MONOLITNOM KOMPOZITNOM KONSTRUKCIJOM I LANČANIM ZAKRETNIM MEHANIZMOM S DVA MOTORA [4].....	25
SLIKA 9. NOSEĆA ČELIČNA KONSTRUKCIJA EURO TROUGH KOLEKTORA [6] .....	25
SLIKA 10. NOSEĆA KONSTRUKCIJA EURO TROUGH KOLEKTORA TIJEKOM POSTAVLJANJA REFLEKSIVNIH PANELA [6].....	26
SLIKA 11. DIJELOVI APSORBERSKE CIJEVI PARABOLIČNOG KOLEKTORA [1] .....	27
SLIKA 12. VEZA UDALJENOSTI ZEMLJE OD SUNCA I IZNOSA SOLARNE KONSTANTE [1] .....	30
SLIKA 13. KRETANJA INSOLACIJE ZA 2009. GODINU NA PODRUČJU GRADA ZAGREBA .....	31
SLIKA 14. SOLARNA ELEKTRANA S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA I ORGANSKIM RANKINOVIM CIKLUSOM .....	32
SLIKA 15. DIJELOVI PRIMARNOG KRUGA SOLARNE ELEKTRANE S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA I ORGANSKIM RANKINOVIM CIKLUSOM.....	33
SLIKA 16. DIJELOVI SEKUNDARNOG KRUGA SOLARNE ELEKTRANE S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA I ORGANSKIM RANKINOVIM CIKLUSOM .....	37
SLIKA 17. T-S DIJAGRAM NEKOLIKO UOBIČAJENIH ORGANSKIH RADNIH FLUIDA I VODE [7] .....	41
SLIKA 18. SLIKA ORC POSTROJENJA S ZADANOM NOMENKLATUROM .....	45
SLIKA 19. SHEMATSKI PRIKAZ MATEMATIČKOG MODELA .....	47
SLIKA 20. SATNA RASPODJELA DOZRAČENE TOPLINSKE ENERGIJE ZA DAN 03.08.2009. ....	48

SLIKA 21. PROSJEČNA SATNA DOZRAČENA TOPLINSKA ENERGIJA, SA SREDNJOM VRIJEDNOŠĆU, ZA PROTEKLA TRI DANA OD 03.08.2009.....	48
SLIKA 22. ODREĐIVANJE IZRAVNO PREDANE TOPLINE IZMJENJIVAČU I POHRANJUJE U TOPLINSKOM SPREMNIKU.....	49
SLIKA 23. DOKAZ JEDNAKOSTI POHRANJENE I RASPOLOŽIVE TOPLINSKE ENERGIJE.....	49
SLIKA 24. USPOREDNI DIJAGRAM PROSJEČNE I STVARNE INSOLACIJE.....	50
SLIKA 25. PRIKAZ TOPLINSKIH ENERGIJA .....	51
SLIKA 26. GRAFIČKI PRIKAZ UTJECAJA RAZLIKE OČEKIVANE I DOZRAČENE ENERGIJE NA KOREKCIJU VRIJEDNOSTI LINIJE PROSJEKA .....	52
SLIKA 27. ODREĐIVANJE ENERGIJE KOJA SE ODVODI IZ TOPLINSKOG SPREMNIKA ZA SNABDIJEVANJE ENERGETSKIH POTREBA POSTROJENJA .....	53
SLIKA 28. T-S DIJAGRAMA ORGANSKOG RANKINOVOG CIKLUSA ZA PRIMJENU PRI VISOKIM (A) I NISKIM (B) TEMPERATURAMA [10] .....	53
SLIKA 29. SATNA DOZRAČENA TOPLINSKA ENERGIJA KROZ GODINU.....	59
SLIKA 30. PRIKUPLJENI TOPLINSKI TOK KROZ GODINU .....	60
SLIKA 31. RASPOLOŽIVI TOPLINSKI TOK NA IZMJENJIVAČU TOPLINE KROZ GODINU .....	61
SLIKA 32. POHRANJENA TOPLINSKA ENERGIJA U TS.....	61
SLIKA 33. SATNA PROMJENA KOLIČINE ENERGIJE U TS.....	62
SLIKA 34. PONAŠANJE VRIJEDNOSTI PROTOKA ORGANSKOG RADNOG MEDIJA KROZ GODINU ...	63
SLIKA 35. KRETANJE IZLAZNE ELEKTRIČNE SNAGE POSTROJENJA .....	63
SLIKA 36. UVEĆANI SEGMENT IZLAZNE ELEKTRIČNE SNAGE POSTROJENJA .....	64
SLIKA 37. POHRANJENA TOPLINSKA ENERGIJA U TS ZA MODEL S PROGNOZOM VREMENA.....	65
SLIKA 38. SATNA PROMJENA KOLIČINE ENERGIJE U TS ZA MODEL S PROGNOZOM VREMENA....	66
SLIKA 39. IZLAZNA ELEKTRIČNA SNAGA POSTROJENJA ZA MODEL S PROGNOZOM VREMENA.....	66
SLIKA 40. POHRANJENA ENERGIJA U TS ZA MODEL S TJEDNIM SPREMNIKOM .....	69
SLIKA 41. PROMJENA KOLIČINE ENERGIJE U TS ZA MODEL S TJEDNIM SPREMNIKOM .....	70
SLIKA 42. IZLAZNA ELEKTRIČNA SNAGA POSTROJENJA ZA MODEL S TJEDNIM TS.....	71
SLIKA 43. IZLAZNA ELEKTRIČNA SNAGA POSTROJENJA ZA MODEL SA SEZONSKIM TS .....	72
SLIKA 44. POHRANJENA TOPLINSKA ENERGIJA U TS ZA MODEL SA SEZONSKIM SPREMNIKOM ..	72
SLIKA 45. PROMJENA KOLIČINE ENERGIJE U TS ZA MODEL SA SEZONSKIM SPREMNIKOM.....	73

### III. POPIS TABLICA

TABLICA 1. PROSTORNI ZAHTJEVI SOLARNIH TERMoeLEKTRANA [1] .....	18
TABLICA 2. KONCENTRACIJSKI FAKTORI I TEHNIČKI PARAMETRI ODABRANIH SOLARNIH TERMoeLEKTRANA [1] .....	18
TABLICA 3. CIJENE POSTOJEĆIH POSTROJENJA S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA [4] .....	23
TABLICA 4. SVOJSTVA MEDIJA ZA POHRANU TOPLINSKE ENERGIJE [1].....	35
TABLICA 5. MAKSIMALNE KOLIČINE TOPLINSKE ENERGIJE KOJE SE MOGU POHRANITI PO KILOGRAMU NAVEDENIH MEDIJA .....	35
TABLICA 6. PREDNOSTI I NEDOSTATCI OBAJU TEHNOLOGIJA .....	43
TABLICA 7. SIMULACIJOM DOBIVENE KORISNOSTI POSTROJENJA ZA IZABRANE RADNE MEDIJE..	58
TABLICA 8. RAZLIKA U MAKSIMALNIM POTREBAMA ZA POHRANOM ENERGIJE SA I BEZ UPORABE PROGNOZE VREMENA .....	67
TABLICA 9. POTREBNE VELIČINE TOPLINSKIH SPREMNIKA .....	76

#### IV. POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

$1,x$	-	točka x primarnog kruga
$2,x$	-	točka x sekundarnog kruga
$A$	$[m^2]$	površina
$c$	$[J/kgK]$	toplinski kapacitet
$c_s$	$[m/s]$	brzina svjetlosti
$d_s$	$[m]$	promjer sunca
$D_u$	$[m]$	unutarnji promjer
$E$	$[J]$	energija
$E_{električno}$	$[Wh]$	isporučena električna energija u mrežu
$E_{SC}$	$[W/m^2]$	solarna konstanta
$h(2,y)$	$[J/kg]$	entalpija u točki y sekundarnog kruga
$L_{ES}$	$[m]$	udaljenost zemlje od sunca
$m$	$[kg]$	masa
$p(2,y)$	$[Pa]$	tlak u točki y sekundarnog kruga
$P_{el}$	$[W]$	električna izlazna snaga električnog generatora
$P_{np}$	$[W]$	snaga napojne pumpe
$P_{ppk}$	$[W]$	snaga pumpe primarnog kruga
$P_{turbine}$	$[W]$	snaga turbine
$Q$	$[W]$	toplinska energija
$q$	$[W]$	toplinski tok

$q(1-2)$	$[W]$	toplinski tok na izmjenjivaču između primarnog i sekundarnog kruga
$Q(1-2)$	$[Wh]$	izmjenjena toplinska energija na izmjenjivaču između primarnog i sekundarnog kruga
$q_{dozračeno}$	$[W/m^2]$	dozračena toplinska energija od sunca po jedinici površine
$q_{kondenzatora}$	$[W]$	toplinski tok na kondenzatoru
$q_{m,orm}$	$[kg/s]$	maseni protok organskog radnog medija
$Q_{max}$	$[J/kg]$	maksimalna specifična pohranjena toplinska energija
$q_{prikupljeno}$	$[W]$	prikupljena toplinska energija od sunca
$Q_{TS,max}$	$[Wh]$	potreban toplinski kapacitet dnevnog toplinskog spremnika
$Q_{TS,max,sezonski}$	$[Wh]$	potreban toplinski kapacitet sezonskog toplinskog spremnika
$Q_{TS,max,tjedni}$	$[Wh]$	potreban toplinski kapacitet tjednog toplinskog spremnika
$s(2,y)$	$[J/kgK]$	entropija u točki y sekundarnog kruga
$t$	$[h]$	vrijeme
$T(2,y)$	$[K]$	temperatura u točki y sekundarnog kruga
$T_{max,rm}$	$[K]$	maksimalna temperatura kemijske stabilnosti radnog medija
$V_{TS}$	$[m^3]$	volumen (zapremnina) dnevnog toplinskog spremnika
$V_{TS,p}$	$[m^3]$	volumen (zapremnina) dnevnog toplinskog spremnika postrojenja s vremenskom prognozom

$V_{TS,sezonski}$	$[m^3]$	volumen (zapremnina) sezonskog toplinskog spremnika
$V_{TS,tjedni}$	$[m^3]$	volumen (zapremnina) tjednog toplinskog spremnika
$\Delta T$	$[K][^{\circ}C]$	razlika temperatura
$\eta$	-	ukupni koeficijent iskoristivosti postrojenja
$\eta_{el}$	-	koeficijent iskoristivosti električnog generatora
$\eta_{meh}$	-	koeficijent mehaničkih gubitaka
$\eta_{np}$	-	koeficijent iskoristivosti napojne pumpe
$\eta_{turbine}$	-	koeficijent iskoristivosti turbine
$\rho$	$[kg/m^3]$	gustoća
$ORC$	-	organski Rankinov ciklus
$PV$	-	foto-napon
$RC$	-	Rankinov ciklus
$TS$	-	toplinski spremnik
$VBA$	-	Microsoft Visual Basic for Applications
$a$	-	apsolutno (indeks)

## 1. UVOD

Svrha ovog rada je izvesti matematički model solarne elektrane s organskim Rankinovim ciklusom te uporabom odgovarajućeg toplinskog spremnika premostiti problem intermitencije sunčevog zračenja.

Pri izvođenju matematičkog modela solarne elektrane potrebno je krenuti od Rankinovog ciklusa kao takvog te ga prilagoditi uvjetima koje postavlja sunce kao izvor energije.

Kod klasičnih elektrana Rankinov ciklus je izveden između maksimalnih temperatura koje mogu podnijeti upotrijebljeni materijali na toploj strani i temperature okoliša na hladnoj strani. To je tako jer sagorijevanjem fosilnih goriva možemo dobiti vrlo visoke temperature te nam izvor toplinske energije ne predstavlja ograničenje. Zbog toga se u klasičnim elektranama kao radni medij koristi voda koja zbog svojih svojstava podnosi vrlo visoke temperature na toploj strani Rankinovog ciklusa.

Kada se Rankinov ciklus, koji se već toliki niz godina koristi u klasičnim termo-energetskim postrojenjima, želi prenijeti na solarnu elektranu dolazi do određenih problema koji nisu prisutni kod klasičnih elektrana na fosilna goriva.

Kao osnovni problem nameće se razlika u izvoru energije. Dok fosilna goriva izgaraju pri vrlo visokim temperaturama, te radni medij mogu zagrijati na vrlo visoke temperature, to nije uvijek slučaj kod uporabe sunca kao izvora energije i zagrijavanja radnog medija u solarnim kolektorima. Osim toga pri nižim temperaturama voda više ne predstavlja optimalni radni medij za Rankinov ciklus zbog njene visoke temperature isparavanja te je potrebno naći optimalni medij sukladno vrsti upotrijebljenog solarnog kolektora. Postoji još jedan očiti problem vezan uz sunce kao izvor energije, a to je intermitentnost sunčevog zračenja zbog izmjene dana i noći te zbog vremenskih uvjeta koje je nemoguće predvidjeti pri opisivanju rada solarnog postrojenja.

U ovome radu će se definirati solarna elektrana s organskim Rankinovim ciklusom na području Grada Zagreba i uporabom toplinskih spremnika će se tako definirana solarna elektrana nastojati što više približiti konstantnom izvoru električne energije - klasičnoj elektrani na fosilna goriva.

## 2. UKRATKO O SOLARNIM ELEKTRANAMA

Solarne elektrane su postrojenja za pretvorbu solarne energije u električnu. Danas postoji mnogo načina proizvodnje električne energije iz solarne energije.

Glavna podjela solarnih elektrana: [1]

- Solarne termoelektrane
- Fotonaponske elektrane

Solarne termoelektrane (eng. Solar thermal power plants) iz infracrvenog spektra sunčevog zračenja proizvode toplinsku energiju koja se potom preko mehaničke energije pretvara u električnu energiju dok fotonaponske elektrane (eng. photovoltaic power plants) proizvode električnu struju direktno iz vidljivog spektra sunčevog zračenja. [1]

### 2.1. Solarne termoelektrane

Solarne termoelektrane se dijele na: [1]

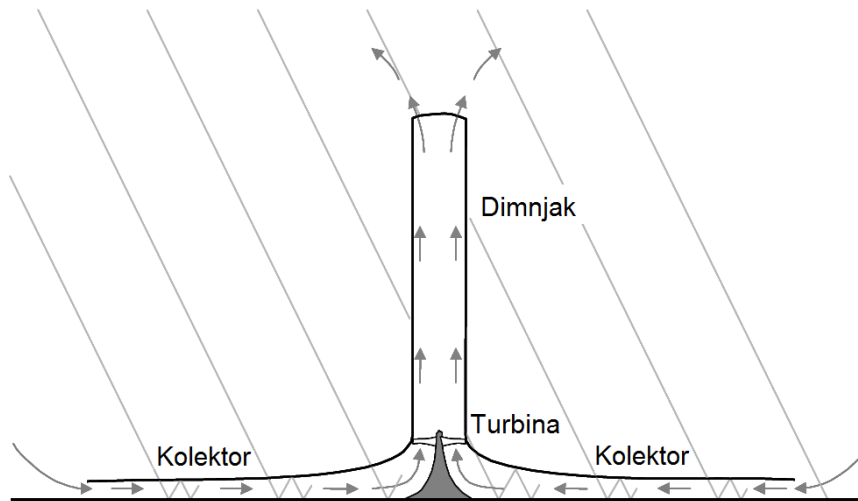
- Elektrane s koncentriranjem sunčevog zračenja
- Elektrane bez koncentriranja sunčevog zračenja

#### ***2.1.1. Elektrane bez koncentriranja sunčevog zračenja***

Elektrane bez koncentriranja sunčevog zračenja koriste energiju slobodnog strujanja medija koje nastaje zbog temperaturne razlike da bi proizvele mehaničku/toplinsku, odnosno na kraju električnu energiju. U ovo skupinu spadaju solarni dimnjaci i solarna jezera. [1]

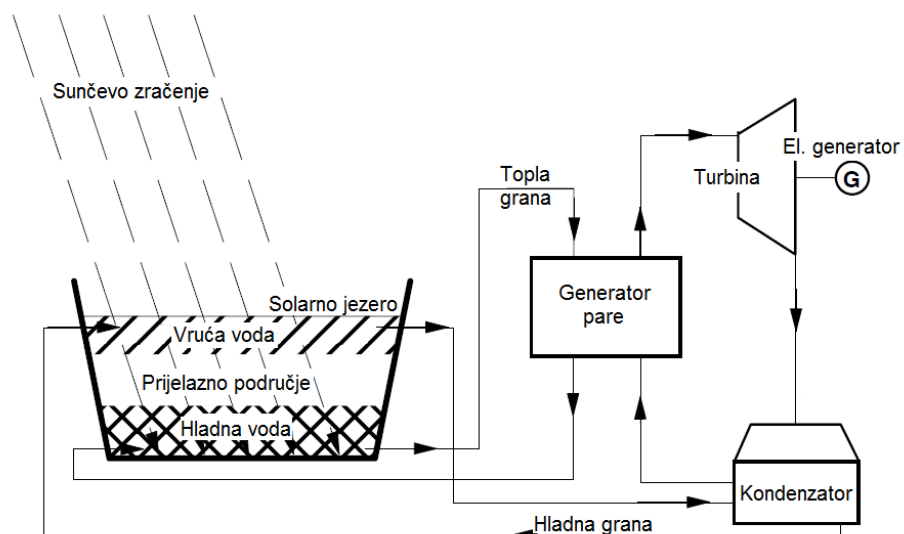
- Solarni dimnjaci (eng. Solar up-draft tower) koriste velike staklene površine da bi zagrijali dovoljne količine zraka koji se pritom zbog uzgona dižu kroz turbine koje se nalaze u visokoj vertikalno postavljenoj cijevi (dimnjaku). Na slici 1. se može vidjeti prikaz rada jedne takve elektrane. [1]





**Slika 1. Prikaz rada solarnog dimnjaka [1]**

- Solarna jezera (eng. Solar pond) služe ustvari samo kao kolektori sunčevog zračenja. Jezera su, kako je moguće vidjeti na slici 2., ispunjena slanom vodom te zbog gradijenta slanosti i temperature na dnu se koncentrira najtoplija voda temperature i do  $100^{\circ}\text{C}$  koja se zatim može upotrijebiti u organskom Rankinovom ciklusu. [1]



**Slika 2. Prikaz rada elektrane sa solarnim jezerom [1]**

### 2.1.2. Elektrane s koncentriranjem sunčevog zračenja

Elektrane s koncentriranjem sunčevog zračenja se danas u energetske smislu smatraju najvažnijima i predstavljaju skupinu najvećih proizvođača električne energije iz solarne energije zbog najmanjih prostornih zahtjeva po kW instalirane snage, najvećoj energetske iskoristivosti, kapacitetu i ostalim tehničkim parametrima koji su prikazani u tablicama 1. i 2. [1]

**Tablica 1. Prostorni zahtjevi solarnih termoelektrana [1]**

Solarni tornjevi	25 - 35 m <sup>2</sup> /kW
Elektrane s fokusiranjem u liniju	10 - 25 m <sup>2</sup> /kW
Elektrane s paraboličnim kolektorima	15 - 30 m <sup>2</sup> /kW
Solarni dimnjaci	~ 200 m <sup>2</sup> /kW
Solarna jezera	~ 55 m <sup>2</sup> /kW

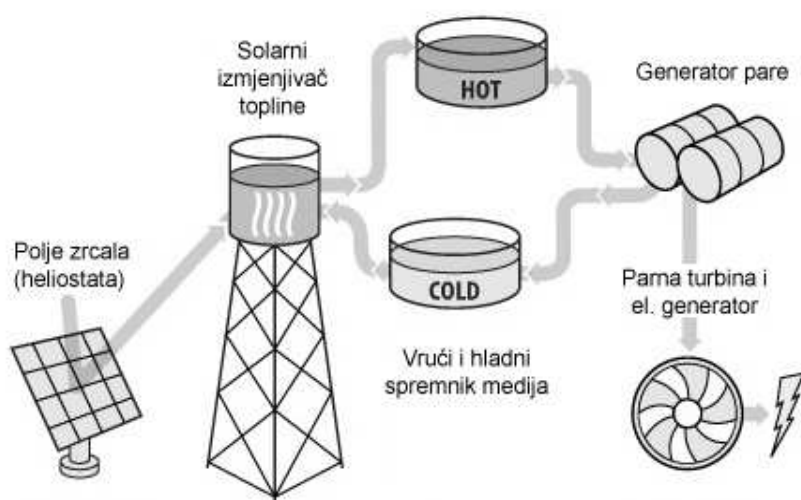
**Tablica 2. Koncentracijski faktori i tehnički parametri odabranih solarnih termoelektrana [1]**

	Solarni tornjevi	Solarni tanjuri	Parabolični kolektori	Fresnel reflektori	Solarna jezera	Solarni dimnjaci
Uobičajeni kapacitet [MW]	30 - 200	0,01 - 1	10 - 200	10 - 200	0,2 - 5	30 - 200
Stvarni kapacitet [MW]	10	0,025	80	0,3	5	0,05
Faktor koncentracije	600 - 1000	do 3000	50 - 90	25 - 50	1	1
Efikasnost [%]	10 - 28	15 - 25	10 - 23	9 - 17	1	0,7 - 1,2
Način rada	rad na mreži	mrežni / otočni	rad na mreži	rad na mreži	rad na mreži	rad na mreži
Status daljnjeg razvoja	+	+	++	0	+	+

U skupinu elektrana s koncentriranjem sunčevog zračenja spadaju: [1]

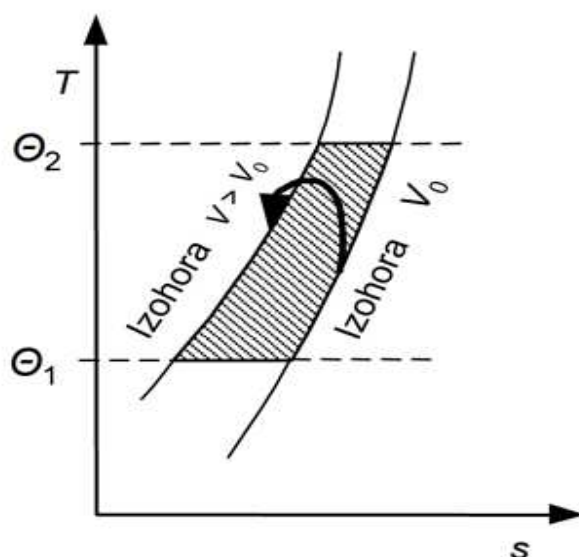
- Solarni tornjevi
- Solarni (Stirling) tanjuri
- Solarne elektrane s fresnel reflektorima
- Solarne elektrane s paraboličnim kolektorima

- Solarni tornjevi (eng. Solar tower power plants) spadaju u sustave koji svu sunčevu energiju sakupljaju u jednoj točki. Zrcala, tzv. heliostati (grčki izraz za "statično sunce") prate položaj sunca tijekom dana u dvije osi i koncentriraju sunčevu svjetlost u jednu točku koja je centralno pozicionirana na vrhu tornja. U toj točki toplinska energija se predaje radnom mediju (zrak, rastaljena sol, voda/vodena para) te se na taj način toplina dovodi termodinamičkom kružnom ciklusu. Zbog mogućnosti postizanja temperatura bliskih konvencionalnim elektranama na fosilna goriva često je medij voda/vodena para koja se zatim direktno upotrebljava kao radni medij u konvencionalnom Rankinovom ciklusu. Zbog intermitencije sunčevog zračenja mogu biti upotrjebljeni toplinski spremnici i/ili dogrijavanje na fosilna goriva ili biogoriva kako bi se postigla kontinuirana proizvodnja električne energije. Pojednostavljeni princip rada ovog postrojenja prikazuje slika 3. [1]



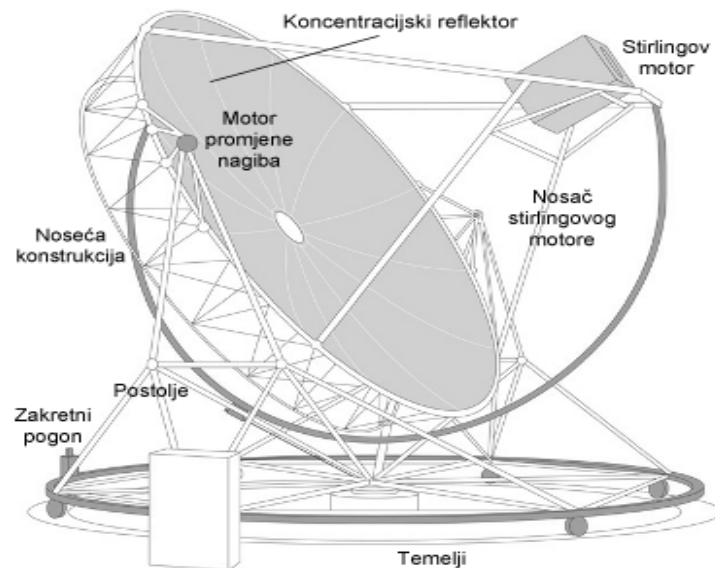
**Slika 3. Princip rada solarne termoelektrane sa solarnim tornjem [2]**

- Solarni tanjuri (eng. Dish/Stirling systems) se sastoje od paraboličnog solarnog koncentratora (tanjura), solarnog izmjenjivača topline, Stirlingovog toplinskog motora i električnog generatora. Parabolični solarni koncentrator prati sunce u dvije osi i usmjerava sunčevo zračenje na solarni izmjenjivač topline koji se nalazi u njegovom fokusu. Tamo je sunčevo zračenje transformirano u toplinsku energiju koja se zatim predaje Stirlingovom toplinskom motoru. [1]



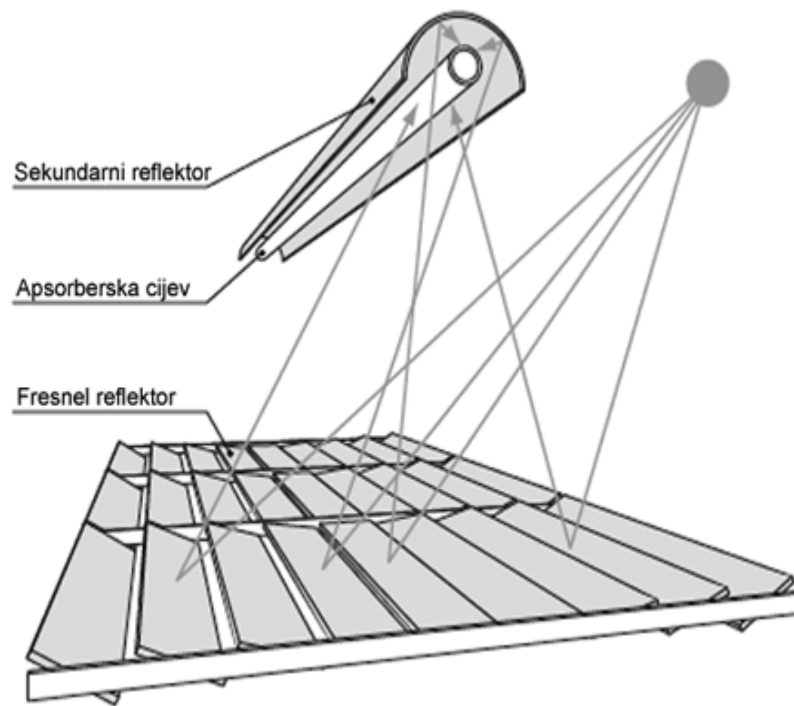
**Slika 4. T-s dijagram rada Stirlingovog toplinskog motora [1]**

Stirlingov toplinski motor po desnokretnom stirlingovom procesu (koji je zatvoren između dvije izoterme i dvije izohore – slika 4.) pretvara toplinsku energiju u mehaničku koja se u električnom generatoru spojenom na motor pretvara u električnu energiju. U kombiniranim sustavima medij može se još dogrijavati izgaranjem plina (zemnog plina ili bioplina). Dijelovi jednog takvog solarnog postrojenja vidljivi su na slici 5. [1]



**Slika 5. Dijelovi solarne termoelektrane s solarnim tanjurom i Stirlingovim toplinskim motorom [1]**

- Solarne elektrane s fresnel reflektorima (eng. Linear Fresnel power plants) nose ime po kolektorima (slika 6.) kojima fokusiraju sunčevu svjetlost. Za razliku od solarnih tanjura i solarnih tornjeva čiji koncentratori koncentriraju svjetlost u točku koncentratori ovih elektrana koncentriraju svjetlost u liniju i nazivaju se linearnim fresnel reflektorima. [1]



**Slika 6. Način fokusiranja sunčeve svjetlosti kod Fresnel kolektora [3]**

U fokusnoj liniji solarnih elektrana s fresnel reflektorima nalazi se cijev kroz koji teče radni medij. Zbog toga što je fokus linija, a ne točka, reflektori prate sunce u samo jednoj osi. Sakupljena toplina od sunca se Rankinovim ciklusom pretvara u rad koji se u električnom generatoru pretvara u električnu energiju. U ovim elektranama, da bi se premostio problem variranja sunčeva zračenja, može se koristiti dogrijavanje medija fosilnim gorivima i/ili se mogu koristiti toplinski spremnici. [1]

- Solarne elektrane s paraboličnim kolektorima (eng. Parabolic trough power plants) se vrlo malo razlikuju od solarnih elektrana s fresnel reflektorima, pri čemu se umjesto fresnel reflektora koristi parabolični reflektor. Ovaj rad se bazira upravo na takvome postrojenju pa će ove elektrane biti detaljnije obrađene u zasebnom poglavlju.

### 3. SOLARNE ELEKTRANE S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA

Solarne elektrane s paraboličnim kolektorima (eng. Parabolic trough power plants) su se zbog konstrukcije kolektora sunčeve energije i njihove modularne strukture pokazale kao najjeftinije za izgradnju te iz te činjenice proizlazi njihova najveća komercijalna rasprostranjenost. Cijena pojedinih izvedbi kolektora se može vidjeti u tablici 3.[4]

**Tablica 3. Cijene postojećih postrojenja s paraboličnim kolektorima [4]**

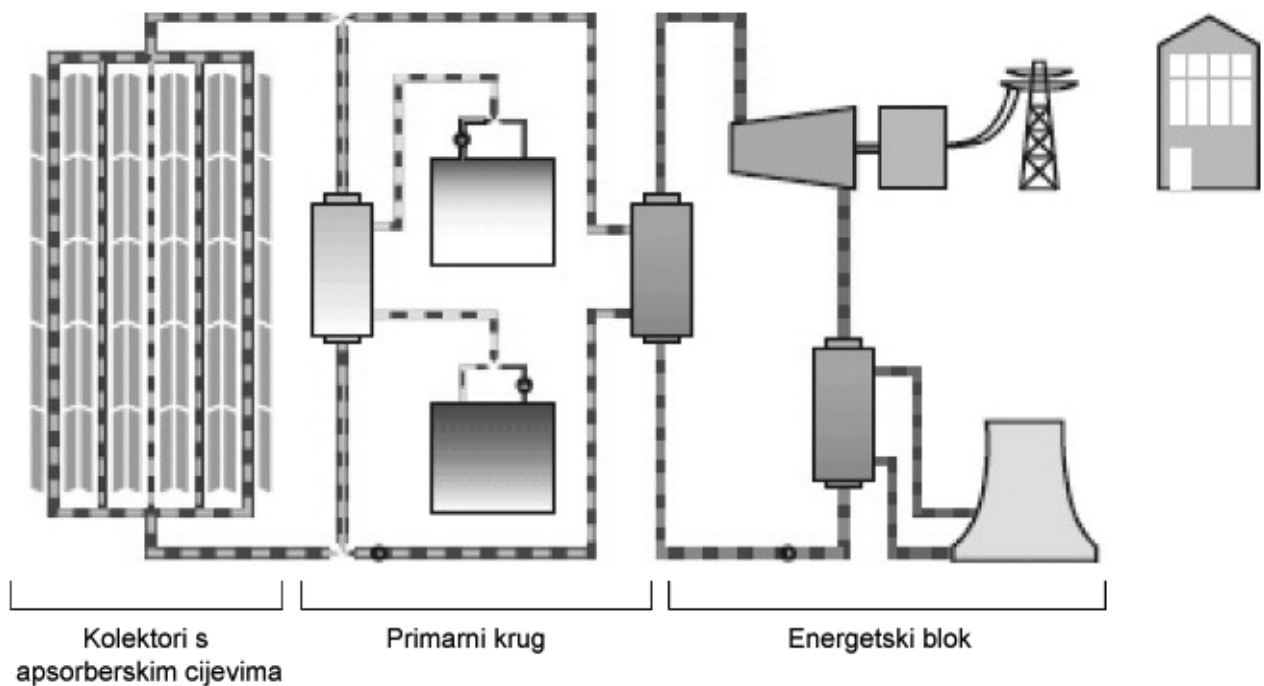
Kolektor	Cijena
LS - 2	\$58/m <sup>2</sup>
LS - 3	\$66/m <sup>2</sup>
EuroTrough	\$58/m <sup>2</sup>
Duke Solar	\$48/m <sup>2</sup>
IST	\$48/m <sup>2</sup>

Kao i kod elektrana s Fresnel kolektorima kod elektrana s paraboličnim kolektorima sunčevo zračenje se također fokusira u liniju. Glavni nedostatak fokusiranja sunčevog zračenja u liniju, a ne u točku, je manja maksimalna postiziva temperatura medija zbog manjeg koeficijenta koncentracije zračenja, međutim ove elektrane to nadoknađuju jeftinijom konstrukcijom jer je potreban sustav praćenja sunca samo po jednoj osi zbog čega je naposljetku i održavanje jednostavnije i jeftinije. [1]

#### 3.1. Dijelovi solarnih elektrana paraboličnim kolektorima

Glavni dijelovi od kojih se sastoje solarne elektrane s paraboličnim kolektorima su: [1]

- Kolektori sa apsorberskim cijevima
- Primarni krug za prijenos topline
- Energetski blok



**Slika 7. Glavni dijelovi solarne elektrane s paraboličnim kolektorima [5]**

### **3.1.1. Kolektori i apsorberske cijevi**

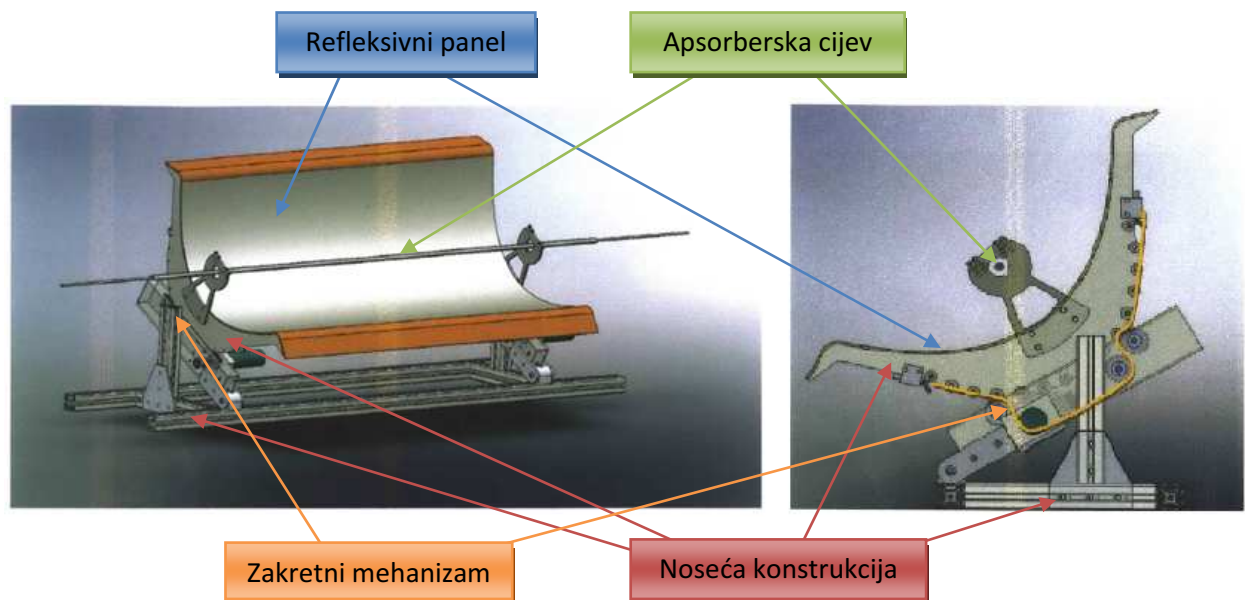
Konstrukcija kolektora se razlikuje od modela do modela pa tako razlikujemo LS-1, LS-2, LS-3, EuroTrough, Duke Solar, IST, itd., ali svi rade na istom principu i sastoje se od istih osnovnih dijelova. [4][6]

Osnovni dijelovi paraboličnih kolektora: [6]

- Noseća konstrukcija - čelična ili monolitna kompozitna konstrukcija s centralnom zakretnom cijevi i V nosačima
- Zakretni mehanizam - zupčanički (lančani) ili hidraulički pogon
- Sustav za praćenje sunca - vremenski kontroliran ili svjetlosno kontroliran
- Refleksivni paneli - parabolična zrcala od staklenih ili metalnih ploča
- Apsorberske cijevi - cijevi s primarnim fluidom u staklenim vakuumskim ovojnicama (HCE - heat collection element)

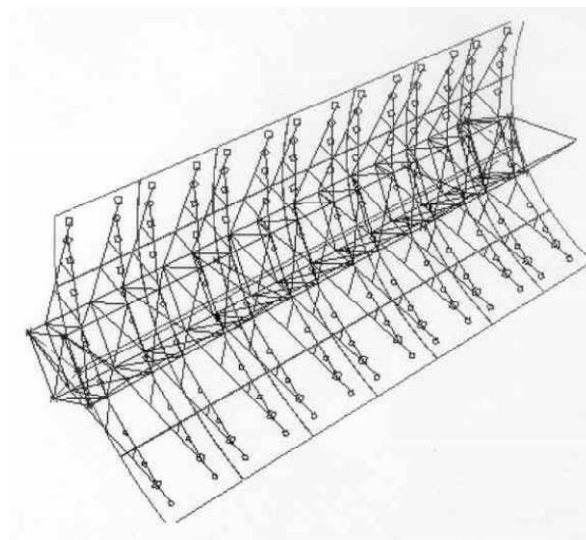
Prikaz dijelova kolektora može se vidjeti na slici 8.





**Slika 8. Dijelovi paraboličnog kolektora na primjeru paraboličnog kolektora s monolitnom kompozitnom konstrukcijom i lančanim zakretnim mehanizmom s dva motora [4]**

Noseća konstrukcija paraboličnog kolektora je 100 do 150m dugačka čelična konstrukcija za koju je najvažnije da bude čvrsta i otporna na nalete vjetra. Osim toga danas se najviše teži da bude što laganija da bi se smanjili investicijski troškovi i opterećenje na zakretni mehanizam za praćenje sunca. Svako daljnje smanjene mase konstrukcije omogućava povećanje duljine (površine) kolektora koju zakreće jedan zakretni mehanizam što vrlo povoljno utječe na smanjenje investicijskih troškova i troškova održavanja. [6]



**Slika 9. Noseća čelična konstrukcija EuroTrough kolektora [6]**

Na noseću konstrukciju, na V nosače, učvršćeni su reflektivni paneli kao što možemo vidjeti na slici 10., dok model same noseće konstrukcije na slici 9.. Reflektivni paneli su ustvari parabolična zrcala izrađena od reflektivnih staklenih i metalnih ploča. [6]

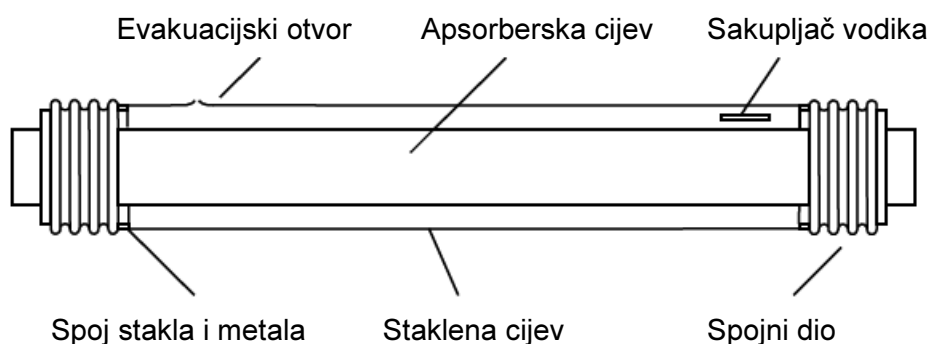


**Slika 10. Noseća konstrukcija EuroTrough kolektora tijekom postavljanja reflektivnih panela [6]**

Danas najrasprostranjenija tehnologija za izradu reflektivnih panela se bazira na debelostjenim zakrivljenim staklenim zrcalima te takvi reflektivni paneli imaju reflektivnosti od 93,5%. Danas se u uporabu uvode i tanki reflektivni filmovi koji postižu reflektivnost od 94% upadnog sunčevog zračenja. [4]

Parabolični reflektivni paneli sunčevu svjetlost reflektiraju i koncentriraju u svojoj fokusnoj liniji. U fokusnoj liniji kolektora se nalazi apsorber. Apsorber (eng. Heat Collecting Element (HCE)) je konvekcijski izolirana cijev koja omogućava prijenos toplinske energije od sunčevog zračenja na radni medij primarnog kruga. Slika 11. prikazuje konstrukciju jedne apsorberske cijevi. Danas su to cijevi od nehrđajućeg čelika presvučene apsorpcijskim premazom koji je otporan na temperature do 500°C te

omogućuje stupanj apsorpcije sunčevog zračenja od 95%, temperature medija do 400°C i emisivnost manju od 14%. Čelična apsorberska cijev se nalazi unutar prozirne staklene cijevi te je prostor između tih dvaju cijevi evakuiran tako da u njemu vlada vakuum. To je zato da bi se smanjili konvekcijski gubici s vrućeg medija zagrijanog na do 400°C i okoliša, a da se ne ometa prijenos topline zračenjem na cijev tj. medij u njoj. Po dužini jednog kolektora nalazi se više apsorberskih cijevi duljine oko 4 metra koje su međusobno spojene. [1][4]



**Slika 11. Dijelovi apsorberske cijevi paraboličnog kolektora [1]**

### **3.1.2. Primarni krug za prijenos topline**

Primarni krug za prijenos topline je sustav cijevi koji povezuje sve kolektore sa izmjenjivačem topline koji predaje toplinu Rankinovom ciklusu, koji predstavlja sekundarni krug kod ovog tipa elektrana. Danas se za prijenos topline koristi visokotemperaturno sintetsko ulje. Zbog limitirane temperaturne stabilnosti ulja, maksimalna radna temperatura je limitirana na 400°C. [1]

Zbog svoje manje cijene, većeg toplinskog kapaciteta i potencijalno veće maksimalne radne temperature, kao alternativa ulju, nameće se rastaljena sol kao medij za prijenos topline. S druge strane rastaljene soli imaju veću viskoznost i višu temperaturu taljenja. Do današnjeg dana se ovaj medij koristi samo u prototipovima solarnih elektrana. [1]

Osim sustava s dva kruga istražuju se mogućnosti i paraboličnih solarnih elektrana samo sa jednim krugom tj. istražuju se mogućnosti generiranja pare u samim apsorpcijskim cijevima. Ovakav način izgradnje solarnih elektrana bi mogao dovesti do

velikog smanjenja investicijskih troškova, zbog nepostojanja drugog kruga i izmjenjivača topline, i povećanja iskoristivosti postrojenja. Međutim kod ovakve konfiguracije postrojenja javljaju se problemi sa isparavanjem vode u horizontalnim cijevima te vrlo visokim optimalnim tlakom vode/pare potrebnim za visoku iskoristivost kružnog ciklusa (uobičajeno između 50 i 100 bar). [1]

Ovisno o izvedbi ovoga kruga postrojenje može biti s ili bez toplinskog spremnika. Toplinski spremnik služi za korekciju nesavršenosti sunca kao izvora topline za elektranu. U njemu se akumulira energija kada je insolacija visoka, a otpušta kada je insolacija niska ili je nema te time omogućava postrojenju proizvodnju električne energije i kada nema dovoljno (ili uopće) sunčeve insolacije za zagrijavanje radnog medija.

### **3.1.3. Energetski blok**

Energetski blok predstavlja sekundarni krug solarne elektrane s parabolničnim kolektorima - Rankinov ciklus.

Ovisno o izvedbi sekundarnog kruga postrojenje može biti izvedeno kao: [1]

- Samostalna solarna termoelektrana
- Solarna termoelektrana s dogrijavanjem pare (najčešće plinom)
- Kombinirana termoelektrana s dogrijavanjem pare plinskom turbinom

Za razliku od druge dvije izvedbe, gdje se najčešće kao radni medij u Rankinovom ciklusu koristi voda, kod samostalne solarne elektrane se kao radni medij u Rankinovom ciklusu najčešće koristi organski medij. To je zbog niže maksimalne temperature medija. Dok se pri dogrijavanju mogu postići temperature kao kod klasičnih termoelektrana, kada dogrijavanja nema temperatura medija sekundarnog kruga je limitirana temperaturom medija u primarnom krugu ( ~ 400°C). Pri tim nižim temperaturama organski mediji pokazuju bolje karakteristike u Rankinovom krugu te se takvi ciklusi zovu organski Rankinovi ciklusi (eng. ORC - Organic Rankine Cycle).

## 4. SOLARNA ENERGIJA

Prije ikakvog proračuna solarnog postrojenja potrebno je znati s kojom količinom solarne energije se raspolaže na prostoru za koji se želi izvesti proračun, te je stoga poželjno znati o čemu sve ovisi količina solarne energije koja na tom području dopire do zemljine površine.

Energija koju koristimo za pogon solarnih elektrana je solarna energija koja dolazi od sunca. Sunce je središnje tijelo našega solarnog sustava; zvijezda najbliža zemlji. U središtu sunca postižu se temperature reda veličine 15 milijuna kelvina. Energija za zagrijavanje sunca se oslobađa procesom nuklearne fuzije u kojoj se atomi vodika spajaju u atome helija. U tom procesu dolazi do gubitka mase i oslobađa se energija proporcionalna tom gubitku prema Einsteinovoj jednadžbi. [1]

$$E = mc_s^2 \quad (4.1)$$

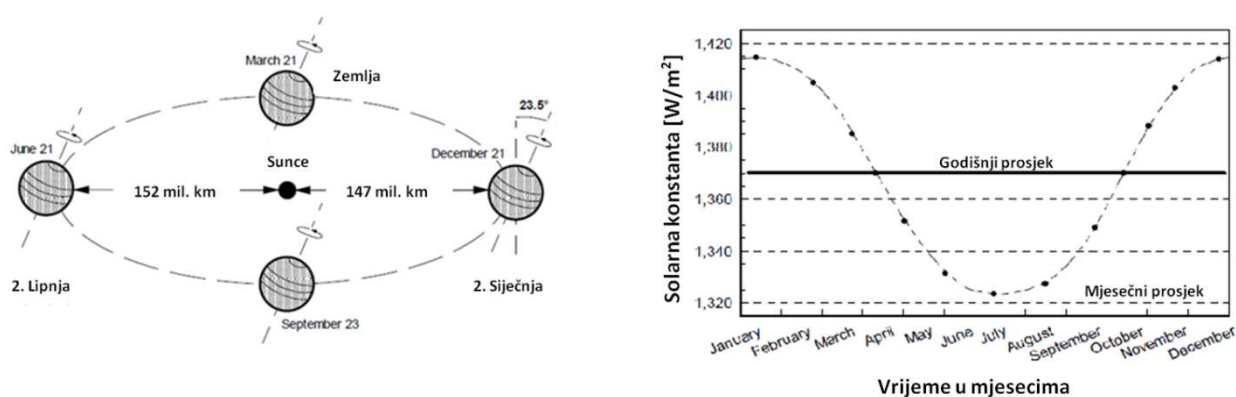
Otpriblike 650 milijuna tona vodika je pretvoreno u 646 milijuna tona helija svake sekunde iz čega se vidi da 4 milijuna tona tvari je svake sekunde pretvoreno u energiju prema Einsteinovoj jednadžbi. [1]

Sunčevo zračenje koje napušta sunce sastoji se od protona, elektrona i elektromagnetskog zračenja. Protoni i elektroni se gibaju brzinom od oko 500km/s i većina njih ne dođe do zemlje nego je odbijena zemljinim magnetskim poljem što je jako važno za opstanak života na zemlji. Elektromagnetsko zračenje koje napušta Sunce, nastalo većinom u njegovoj fotosferi, sastoji se od svih valnih duljina, od kratkovalnog pa do dugovalnog zračenja, i približni je ekvivalent zračenju crnog tijela. [1]

Gustoća elektromagnetskog zračenja sunca se može dobiti iz temperature sunčeve fotosfere ( $\sim 5.785 \text{ K}$ ), stupnja emisije i Stefan-Boltzmannove konstante i otprilike iznosi  $63.5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ . Gustoća zračenja opada sa kvadratom udaljenosti od sunca te se njegova gustoća na vanjskom rubu zemljine atmosfere može izračunati prema jednadžbi 4.2.

$$E_{SC} = \frac{M_S \pi d_S^2}{\pi (2 L_{ES})^2} \quad (4.2)$$

Iz koje se može dobiti da srednja gustoća sunčevog zračenja na vanjskom rubu zemljine atmosfere tijekom godine iznosi  $\sim 1.370 \text{ W/m}^2$ . Ova srednja vrijednost se naziva solarna konstanta. Solarna konstanta se ustvari tokom godine mijenja ovisno o udaljenosti zemlje od sunca te je najveća 2. siječnja ( $\sim 1.420 \text{ W/m}^2$ ), a najmanja 2. lipnja ( $\sim 1330 \text{ W/m}^2$ ). [1]

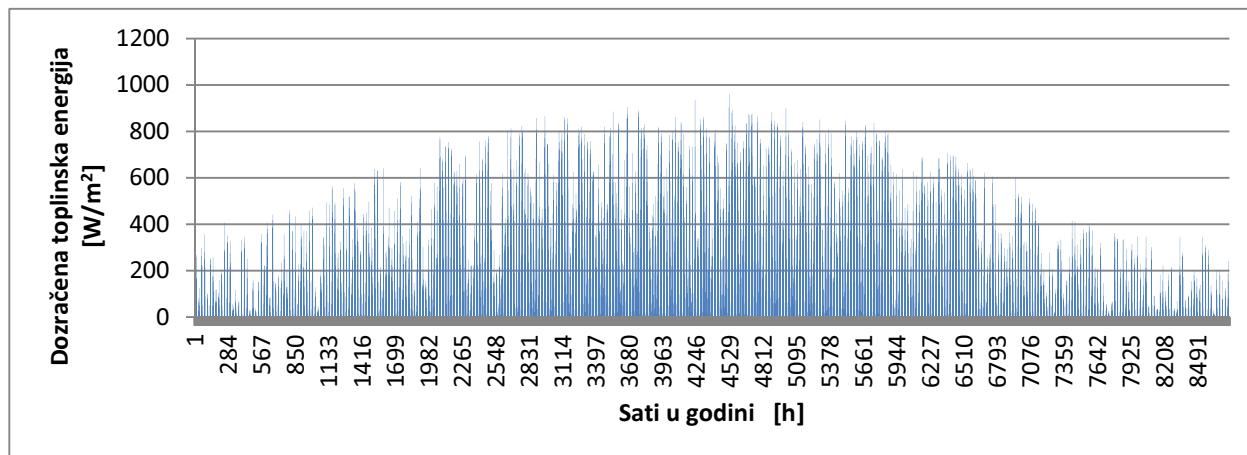


**Slika 12. Veza udaljenosti zemlje od sunca i iznosa solarne konstante [1]**

Unatoč većoj gustoći sunčevog zračenja na vanjskom rubu atmosfere zimi, u našim krajevima (na sjevernoj zemljinoj polutki) su zimi niže temperature nego ljeti kada je zračenje više. To je zbog nagiba zemljine rotacijske osi. Zemljina os s orbitalnom ravninom zatvara kut od  $66,5^\circ$  te zbog toga sjeverna zemljina polutka je više okrenuta suncu tijekom ljetnih mjeseci što ima puno veći utjecaj nego razlika u solarnoj konstanti od  $90 \text{ W/m}^2$ . Zbog svega toga gustoća zračenja od sunca koja dopire na zemlju se jako razlikuje od mjesta i trenutka.

Osim o položaju izabranog mjesta za solarno postrojenje u odnosu na sunce, količina raspoložive energije u svakom trenutku će ovisiti i o stohastičkoj prirodi lokalne naoblake. Zbog svega navedenog, da bi dobiveni rezultati što više odgovarali stvarnom stanju stvari, ulazni podatci satne simulacije rada solarne elektrane s organskim Rankinovim ciklusom će se bazirati na stvarnim izmjerenim satnim podacima o sunčevoj insolaciji.

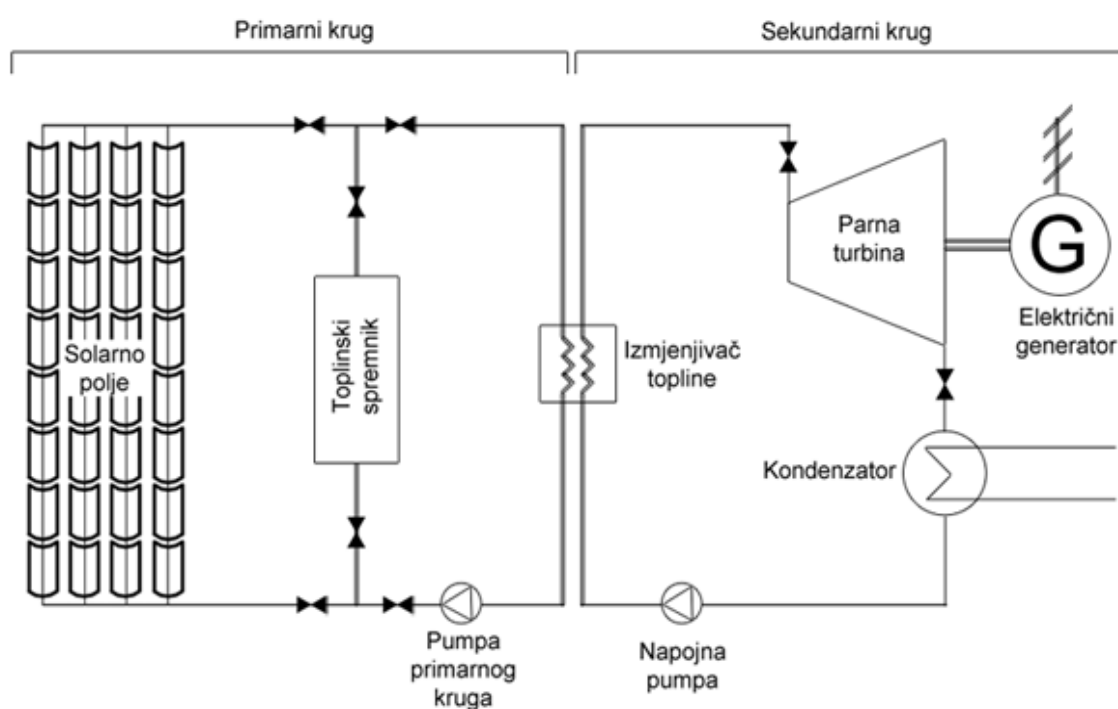
Kao ulazni podatci o dozračenoj količini energije za satnu simulaciju, čiji je matematički model i čiji su rezultati opisani u nastavku ovoga rada, upotrijebljeni su podatci o satnoj insolaciji za 2009. godinu za područje Grada Zagreba.



**Slika 13. Kretanja insolacije za 2009. godinu na području Grada Zagreba**

## 5. SOLARNA ELEKTRANA S PARABOLIČNIM KOLEKTORIMA I ORGANSKIM RANKINOVIM CIKLUSOM

Dok su prethodno ukratko opisane sve vrste solarnih elektrana, sljedeća poglavlja će se fokusirati na postrojenja na kojima je baziran matematički model, a to je solarna elektrana s paraboličnim kolektorima, organskim Rankinovim ciklusom i toplinskim spremnikom. Na slici 14. prikazana je shema jedne takve elektrane.



**Slika 14. Solarna elektrana s paraboličnim kolektorima i organskim Rankinovim ciklusom**

Zbog same prirode zadatka, gdje je bitno premostiti intermitentnost sunčevog zračenja uporabom solarnog spremnika logično je izabrati solarnu elektranu bez dogrijavanja medija kao ogledni primjer budući da kod nje nestacionarnost izvora toplinske energije dolazi najviše do izražaja. Osim toga samo zadavanje toplinskog spremnika nalaže da se postrojenje mora sastojati od dva toplinska kruga. Prvi krug služi za prikupljanje topline s kolektora i njezinu predaju sekundarnom krugu Rankinovog ciklusa, ali prilikom spajanja toplinskog spremnika u petlju primarnog kruga njegova uloga postaje puno



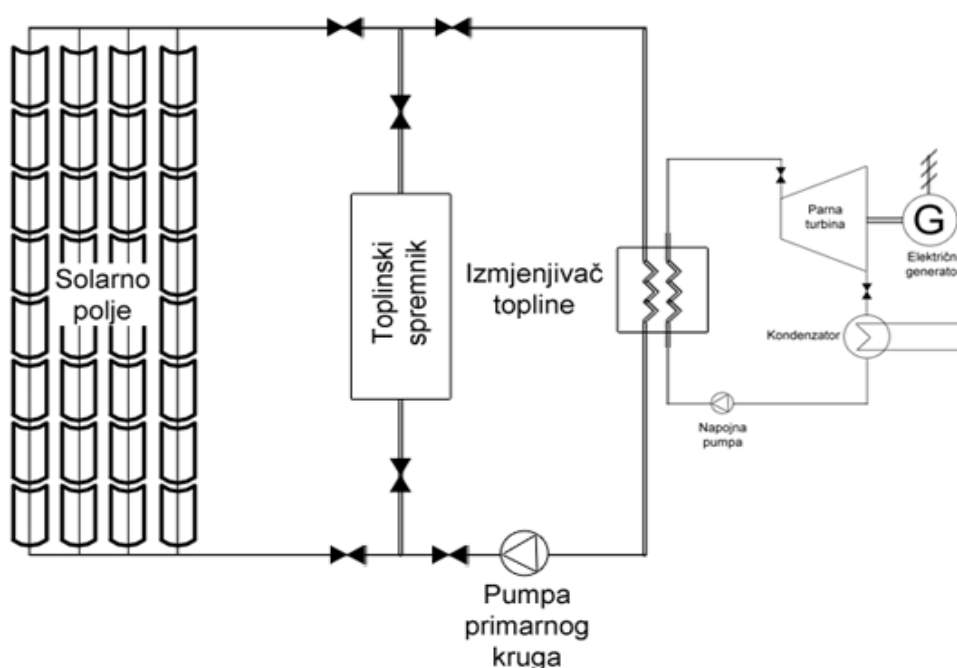
značajnija te postaje odgovoran za osiguranje dovoljne količine toplinske energije za pogon elektrane i kada nema dovoljnog izvora dodatne toplinske energije. Sekundarni krug je krug Rankinovog ciklusa koji je prilagođen radu na nižim temperaturama izmjenom radnog medija, pa se tako umjesto vode koristi organski radni medij o kojemu će više priče biti u zasebnom poglavlju.

### 5.1. Primarni krug

Primarni se krug solarne elektrane s paraboličnim kolektorima i organskim Rankinovim ciklusom sastoji od:

- Paraboličnih solarnih kolektora
- Spremnika topline
- Izmjenjivača topline
- Pumpe primarnog kruga

Ovi dijelovi su grafički prikazani, na shemi postrojenja, na slici 15.



**Slika 15. Dijelovi primarnog kruga solarne elektrane s paraboličnim kolektorima i organskim Rankinovim ciklusom**

Tijekom dana, kada postoji dovoljno sunčevog zračenja, medij primarnog kruga se zagrijava u solarnim kolektorima te se zagrijan djelomično odvodi na izmjenjivač topline, čime se dovodi toplina sekundarnom krugu, a djelomično u toplinski spremnik gdje se pohranjuje. Pohranom tako zagrijanog medija pohranjuje se toplinska energija u obliku njegove osjetne topline. Količina pohranjene energije jednaka je, prema jednadžbi 5.1.1, umnošku mase pohranjenog medija, specifičnog toplinskog kapaciteta medija i razlike temperature između medija u toploj i hladnoj grani primarnog kruga.

$$Q = m c \Delta T \quad (5.1.1)$$

Regulacija potrebnih protoka kroz grane primarnog kruga obavlja se pomoću ventila, a za proticanje medija kroz primarni krug brine se pumpa primarnog kruga.

#### **5.1.1. Medij primarnog kruga**

Ovisno o konstrukciji i namjeni u primarnom krugu se može upotrebljavati više vrsta medija. Jedno od najvažnijih svojstava medija u postrojenjima s toplinskim spremnikom je pristupačnost. Pristupačnost je važna jer su za spremanje toplinske energije potrebne velike količine tog medija. Tako se u primarnim krugovima postrojenja s toplinskim spremnikom najčešće mogu naći silikonska ulja, mineralna ulja i rastaljeni natrijev klorid. Svojstva spomenutih medija, kao i svojstva nekih poznatih materijala za usporedbu, se mogu naći u tablici 4.

**Tablica 4. Svojstva medija za pohranu toplinske energije [1]**

	Maksimalna temperatura [°C]	Toplinska provodljivost [W/mK]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]
Silikonsko ulje	400	0,1	970	2100
Mineralno ulje	300	0,12	900	2600
Rastaljeni natrijev klorid	450	0,57	927	1500
Izolacijske cigle	700	0,9	~ 1000	950
Armirani beton	400	1,5	2500	850
Konstruktivski čelik	700	40	7900	430

Zbog spremnika topline spojenog u primarni krug, koji sprema toplinsku energiju akumulacijom zagrijanog radnog medija primarnog kruga u toplinski izoliranom spremniku, pogodniji medij za uporabu u primarnom krugu je onaj koji može pohraniti više energije po jedinici mase. Uporabom podataka iz tablice 4. i jednadžbe 5.1.1, u koju se uvrštava maksimalna dozvoljena temperatura za taj medij, lako se može izračunati maksimalna količina energije koja se može pohraniti po kilogramu navedenih medija. U tablici 5. mogu se vidjeti izračunate vrijednosti.

$$Q_{max} = c \times T_{max,rm} \quad (5.1.1)$$

**Tablica 5. Maksimalne količine toplinske energije koje se mogu pohraniti po kilogramu navedenih medija**

	Maksimalna temperatura [°C]	Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]	Maksimalna specifična pohranjena energija [J/kg]
Silikonsko ulje	400	2100	840.000
Mineralno ulje	300	2600	780.000
Rastaljeni natrijev klorid	450	1500	675.000

Iz izračunatih podataka vidljivo je da je najbolji radni medij za primarni krug solarnog postrojenja sa toplinskim spremnikom silikonsko ulje. Osim mogućnosti pohrane najveće količine energije po jedinici mase, silikonsko ulje ima još jednu pozitivnu stranu koja omogućava uporabu manjeg volumena spremnika topline u odnosu na druge medije, a to je najveća gustoća.

Silikonsko ulje ne mora uvijek biti najbolji izbor ali zbog baziranja ovog rada na spremnicima toplinske energije predstavljaju logičan izbor za provođenje simulacija i dimenzioniranje potrebnog toplinskog spremnika.

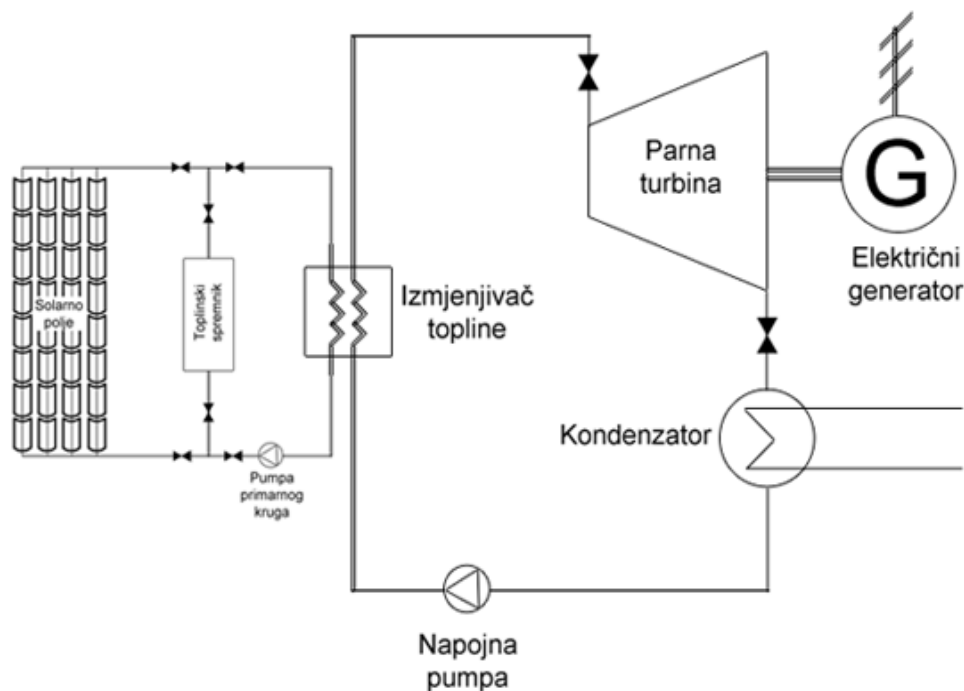
Temperature koje se smiju postići u kolektorima određene su maksimalnom temperaturom stabilnosti medija koja je za silikonsko ulje stavljena na 400°C.

## **5.2. Sekundarni krug**

Primarni se krug ove solarne elektrane sastoji od:

- Izmjenjivača topline
- Parne turbine
- Kondenzatora
- Napojne pumpe

Ovi dijelovi su grafički prikazani, na shemi postrojenja, na slici 16.



**Slika 16. Dijelovi sekundarnog kruga solarne elektrane s paraboličnim kolektorima i organskim Rankinovim ciklusom**

Ovaj krug se ustvari sastoji od svih dijelova od kojih se sastoji i jednostavna klasična termoelektrana. U ovaj krug se za optimizaciju koeficijenta efikasnosti postrojenja može još dodati i regenerativni zagrijač napojne vode, ali to nije cilj ovoga rada.

U ovome krugu se odvija Rankinov desnokružni proces. Toplina se s medija primarnog kruga preko izmjenjivača topline predaje mediju sekundarnog kruga prilikom čega medij izobarno isparava. Para medija dolazi u turbinu gdje dolazi do ekspanzije medija uz proizvodnju mehaničkog rada te se nakon toga hladi i ukapljuje izobarno u kondenzatoru te se pomoću napojne pumpe tjera ponovno u izmjenjivač topline.

Bitna razlika u odnosu na krug klasične termoelektrane su radni parametri medija. Dok se u klasičnim termoelektranama, u sekundarnom krugu, dosežu temperature vodene pare od  $\sim 600^{\circ}\text{C}$  i 250bar, maksimalna temperatura medija sekundarnog kruga u solarnim postrojenjima je ograničena temperaturom medija primarnog kruga od max.  $\sim 400^{\circ}\text{C}$ . Zbog toga voda u ovakvim solarni postrojenjima nije optimalan izbor za medij sekundarnog kruga te se mora odabrati drugi radni medij.

### **5.2.1. Medij sekundarnog kruga**

Budući da voda zahtijeva visoke temperature pare za pogon Rankinovog ciklusa, unutar solarnog postrojenja koje radi na relativno niskim temperaturama, moraju se sagledati drugi radni mediji - primarno organski mediji. Takvi Rankinovi ciklusi, koji umjesto vode kao radni medij koriste organski medij, se nazivaju organski Rankinovi ciklusi ili ORC (eng. Organic Rankine Cycle).

Izbor radnog medija je obrađen u velikom broju znanstvenih publikacija. U većini znanstvenih radova predlaže se usporedba između grupe kandidata za radni medij. Ti se mediji uspoređuju u poljima termodinamičkih performansi samih medija te na temelju rezultata u detaljnom termodinamičkom modelu Rankinovog ciklusa. [7]

Zbog toga što su optimalni radni uvjeti neraskidivo vezani uz izabrani radni fluid, optimizacija mora biti provedena za svaki fluid koji se uspoređuje. [7]

Pri odabiru prikladnog radnog fluida trebaju se razmatrati sljedeće odrednice: [7]

- Termodinamičke performanse - efikasnost i/ili snaga trebaju biti najveće za raspoloživu temperaturu izvora topline
- Pozitivna ili izentropska linija zasićenja pare - da bi se izbjegla mokra para na kraju ekspanzije i pregrijavanje
- Visoka gustoća pare - niska gustoća pare vodi k velikom protoku te povećanju padova tlaka u izmjenjivačima topline zbog čega mora biti povećana turbina - povećanje troškova
- Mala viskoznost - mala viskoznost u tekućem i parovitom stanju je potrebna da bi omogućila visoki koeficijent prolaza topline uz male gubitke trenjem
- Visoki koeficijent toplinske provodnosti fluida - omogućava veliki toplinski tok u izmjenjivačima
- Zadovoljavajući tlak isparavanja - visoki tlak dovodi do većih investicijskih troškova i kompleksnosti postrojenja

- Pozitivni kondenzacijski tlak - niski tlak trebao bi biti viši od atmosferskog tlaka da se izbjegne infiltracija zraka
- Visokotemperaturna stabilnost - za razliku od vode, organski fluidi pate od kemijske degradacije pri visokim temperaturama te je maksimalna temperatura izvora topline ograničena kemijskom stabilnošću radnog medija
- Niska temperatura taljenja - temperatura taljenja treba biti niža od najniže okolišne temperature da se izbjegne smrzavanje radnog fluida
- Visok stupanj sigurnosti - treba zadovoljavati ASHARE Standard 34 - treba zadovoljavati uvjete toksičnosti i zapaljivosti
- Nizak stupanj utjecaja na ozon - potencijal utjecaja na ozon mora biti što manji
- Niski potencijal povećanja stakleničkog efekta
- Dovoljna raspoloživost i niska cijena - fluidi koji se već upotrebljavaju u industriji su lakše dobavljivi i cjenovno prihvatljiviji

Iako se mnogi fluidi uspoređuju u znanstvenoj literaturi samo mali broj od tih fluida se zapravo koristi u komercijalnim elektranama s organskim Rankinovim ciklusom. Ti fluidi, klasificirani po kritičnoj temperaturi (Sylvain Quoilin & Lemort, 2009) su: [7]

- HFC - 134a: Većinom se upotrebljava u geotermalnim postrojenjima i za niskotemperaturno iskorištavanje otpadne topline
- HFC - 245fa: Koristi se kao niskotemperaturni radni medij
- n - pentane: Komercijalno se upotrebljava samo u solarnim ORC elektranama u Nevadi, a u ostale uporabe spada srednjotemperaturno iskorištavanje otpadne i geotermalne topline

- Solkatherm: Većinom se koristi za iskorištavanje otpadne topline
- OMTS: Koristi se u trigeneracijskim postrojenjima
- Toluene: Koristi se u postrojenjima za iskorištavanje otpadne topline

U zadatku se traži da se u sklopu ovoga rada izvrši izbor organskog radnog medija s obzirom na moguću temperaturu svježe pare. Zbog maksimalne moguće temperature medija primarnog kruga od 400°C, njene moguće oscilacije ovisno o vremenskim uvjetima te zbog naknadnog hlađenja medija, zbog nesavršenosti toplinske izolacije toplinskog spremnika, pri akumulaciji toplinske energije za korištenje za vrijeme nedovoljne insolacije, vidljivo je da maksimalna temperatura svježe pare može biti samo znatno niža od te vrijednosti.

Prema zadanim ulaznim parametrima, zadanim za ovaj zadatak, temperatura svježe pare na ulazu u turbinu je 250°C što odgovara prije postavljenim zahtjevima i omogućava prijenos topline u izmjenjivaču i pri nepovoljnim vremenskim uvjetima. Prema podacima istraživanja Jorge Facão, Ana Palmero-Marrero i Armando C. Oliveira[8] te S. Masheiti, B. Agnew i S. Walker[9] vidljivo je da se svi navedeni organski mediji, u mokrom ili pregrijanom stanju pa čak i pri nadkritičnim temperaturama, mogu koristiti pri ovdje zadanim temperaturama svježe pare.

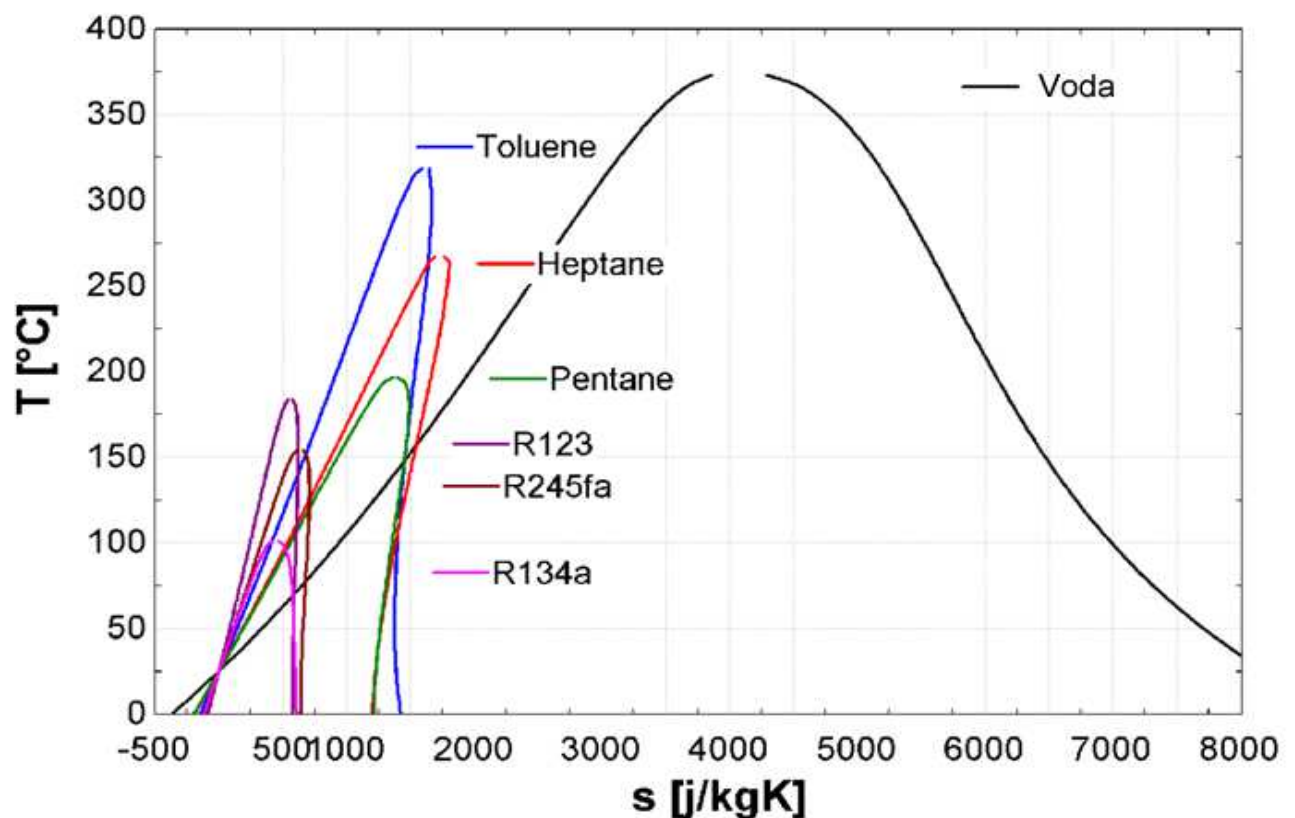
Uzimajući u obzir sve dostupne podatke nemoguće je jednoznačno odrediti koji je organski medij najbolji za primjenu u ovome radu te će se izbor medija obaviti u poglavlju 7. ovoga rada, na matematičkom modelu izvedenom u sklopu ovoga rada, između medija čija su svojstva sadržana u bazi podataka korištenoj za izvođenje simulacije, na temelju iskoristivosti postrojenja.

### **5.2.2. Usporedba organskog Rankinovog ciklusa s parnim Rankinovima ciklusima**

Na slici 17. prikazane su, u T-s dijagramu, linije zasićenja vode i nekoliko tipičnih organskih zadanih medija za primjenu u organskim Rankinovima ciklusima. Mogu biti uočene dvije bitne razlike između linije zasićenja vode i linija zasićenja ORC medija: [7]



- Linija suho-zasićenje vodene pare (desni dio zvona za vodu) ima negativni nagib, dok je linija za organske medije više okomita ili čak ima pozitivan nagib. Kao posljedica toga, ne postoji mogućnost da na kraju ekspanzije para ORC medija bude loše kvalitete (sadrži kapljice medija u tekućem stanju) te nema potrebe za dodatnim pregrijavanjem pare ORC medija i pregrijačima prije turbine.
- Entropijska razlika između vrele kapljevine i suhozasićene pare ORC medija je puno manja kod ORC medija što znači da je i manja toplina isparavanja. Zbog toga, za isti predani toplinski tok u isparivaču, maseni protok ORC medija mora biti puno veći nego što bi trebao biti da kroz isti sustav protiče voda. To dovodi do povećanja potrošnje električne energije za pogon napojne pumpe.



Slika 17. T-s dijagram nekoliko uobičajenih organskih radnih fluida i vode [7]

- Pregrijavanje. Organski fluidi su obično već pregrijani na kraju ekspanzije te nije potrebno dodatno pregrijavanje u ORC sustavima, za razliku od parnih sustava. Odsutnost kondenzacije prilikom ekspanzije u ORC sustavima drastično smanjuje mogućnost korozije turbinskih lopatica zadnjih stupnjeva turbine te povećava životni vijek sa 15 - 20 godina, što je uobičajeno za parne turbine, na do 30 godina (Bundela & Chawla, 2010). [7]
- Niskotemperaturni rad. Zahvaljujući nižoj temperaturi isparavanja organskih medija, toplina može biti dovođena na puno nižoj temperaturi što omogućava uporabu u geotermalnim i solarnim elektranama.
- Veličina komponenata. Veličina komponenata je ovisna o volumenskom protoku radnog fluida zato jer se padovi tlaka povećavaju sa kvadratom brzine fluida što dovodi do potrebe za povećanjem hidrauličkog promjera izmjenjivača topline i promjera cijevi kako bi se smanjila brzina strujanja. Veličina turbine je proporcionalna volumskom protoku medija.
- Ulazna temperatura medija u turbinu. U parnim Rankinovim ciklusima, zbog zahtjeva pregrijavanja, potrebna je na ulazu u turbinu temperatura pare veća od 450 °C da bi se izbjegla kondenzacija vode prilikom ekspanzije. To dovodi do većih temperaturnih naprezanja isparivača i lopatica turbine te povećava investicijske troškove
- Energetske potrebe pumpe. Potrošnja pumpe je proporcionalna volumskom protoku fluida i razlici tlakova prije i poslije pumpe. Kod parnih Rankinovitih ciklusa protok vode je relativno malen i odnos energetske potrošnje pumpe i izlazne snage turbine (BWR – Back Work Ratio) iznosi oko 0,4%, dok je kod ORC postrojenja ta je vrijednost uobičajeno na razini od 2, 3% pa sve do 10% za ORC medije s nižom kritičnom temperaturom.
- Visoki tlak. Kod parnih sustava, tlakovi su od 60 do 70 bara i visoka toplinska opterećenja povećavaju kompleksnost i cijenu generatora pare. U ORC sustavima tlakovi ne prelaze 30 bara.

- Kondenzacijski tlak. Da bi se izbjegla infiltracija zraka u sustav preporučljive su visoke temperature kondenzacije. To nije slučaj sa vodom čiji je tlak kondenzacije obično manji od 100 mbar<sub>a</sub>. Niskotemperaturni organski mediji, kao što su HFC-245fa, HCFC-123 ili HFC-134a, zadovoljavaju ovu preporuku budući da kondenziraju na tlaku višem od atmosferskog. Do problema dolazi kod ORC medija sa višom kritičnom temperaturom poput hexana ili toluena koji kondenziraju na tlakovima nižim od atmosferskog pri okolišnoj temperaturi.
- Konstrukcija turbine. U parnim sustavima pad tlaka i entalpijski pad su jako veliki na turbini. To sa sobom vuče uporabu turbina s više ekspanzijskih stupnjeva. Kod ORC sustava entalpijski pad je puno manji te jedno ili dvostupanjska turbina je uobičajeno dovoljna, što jako utječe na smanjenje investicijskih troškova.
- Stupanj korisnosti. Stupanj korisnosti visokotemperaturnih ORC sustava ne prelazi 24%. Tipični parni Rankinov sustav ima efikasnost veću od 30%, ali i kompliciraniju konstrukciju (u smislu broja komponenata i veličine). Sličan trend se vidi i kada se promatra niskotemperaturne sustave. [7]

Prednosti svake od dviju uspoređenih tehnologija se mogu vidjeti u tablici 6.

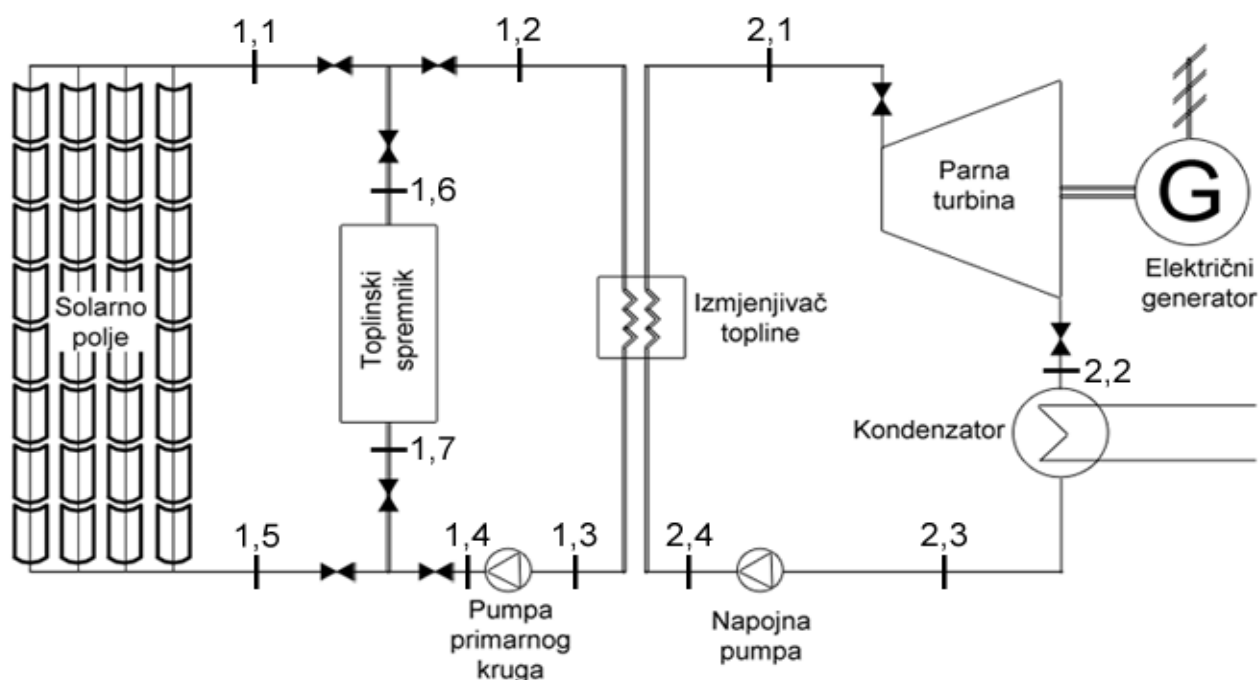
**Tablica 6. Prednosti i nedostaci obaju tehnologija**

Prednosti ORC kruga	Prednosti parnog kruga
<p>Nema pregrijača</p> <p>Niža temperatura na ulazu turbine</p> <p>Manje postrojenje (veća gustoća fluida)</p> <p>Niži tlak isparavanja</p> <p>Viši kondenzacijski tlak</p> <p>Bez postrojenja za obradu vode</p> <p>Konstrukcija turbine</p> <p>Niska temperatura povrata topline</p>	<p>Svojstva fluida</p> <p>Visoka efikasnost</p> <p>Manji energetske zahtjevi pumpe</p>

Ekonomski gledano, ORC sustavi su isplativiji kada govorimo o malim i srednjim postrojenjima (instalirane električne snage do nekoliko MW) dok su za velika postrojenja parni sustavi preferirani, osim kada se govori o niskotemperaturnim izvorima topline. [7]

## 6. MATEMATIČKI MODEL

Sva saznanja do kojih se došlo pri pisanju prethodnih poglavlja služe da bi se mogao izvesti matematički model solarne elektrane s organskim Rankinovim ciklusom da bi se na kraju mogla provesti satna simulacija rada elektrane kroz godinu dana.



Slika 18. Slika ORC postrojenja s zadanom nomenklaturom

Slika 18. prikazuje shemu ORC postrojenja, na kojoj će se bazirati matematički model, zajedno s nomenklaturom koja će se upotrebljavati u izvođenju modela. To je solarne elektrane s organskim Rankinovim ciklusom s dva kruga.

## 6.1. Određeni ulazni parametri

Zadatkom zadani parametri:

- Solarna elektrana
- Organski Rankinov ciklus
- Kontinuirana proizvodnja struje
- Toplinski spremnik

Zadani ulazni podatci:

- Temperatura pare na ulazu u turbinu:  $250^{\circ}\text{C}$
- Tlak pare na ulazu u turbinu: 30 bar

Parametri određeni u sklopu zadatka:

- Medij primarnog kruga: Silikonsko ulje
- Maksimalna temperatura medija primarnog kruga:  $400^{\circ}\text{C}$

## 6.2. Matematički model primarnog kruga

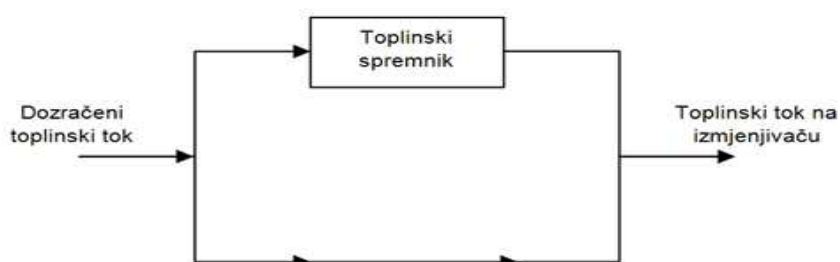
Zbog intermitentnosti sunca kao toplinskog izvora te zahtjeva za kontinuiranom proizvodnjom električne energije većina ovoga poglavlja će se bazirati na traženju, izvedbi i opisu matematičkog modela satnog punjenja i pražnjenja toplinskog spremnika u ovisnosti o insolaciji.

Pri izradi modela teži se, osim kontinuiranoj, što konstantnijoj proizvodnji električne energije bez velikih oscilacija od sata do sata da bi se smanjili zahtjevi koji se stavljaju pred turbinu.

U daljnjem tekstu će biti opisan i objašnjen matematički model koji je izveden za simulaciju dnevnog toplinskog spremnika koji će, po potrebi, kasnije biti prilagođavan.

Budući da se pri modeliranju postrojenja možemo, u svakom satu, bazirati samo na već poznatim podacima, tj. podacima o insolaciji u trenutnom i svim proteklim satima, matematički model se bazira na trodnevnom prosijeku izračunatom iz poznatih podataka o insolaciji od protekla tri dana. Taj prosjek se svaki sat prilagođava ovisno od odstupanja dozračene energije ovoga sata od satnog prosjeka za taj sat u protekla tri dana. Ovaj pristup će pobliže biti objašnjen u daljnje tekstu.

Slikom 19. prikazan je shematski prikaz matematičkog modela.



**Slika 19. Shematski prikaz matematičkog modela**

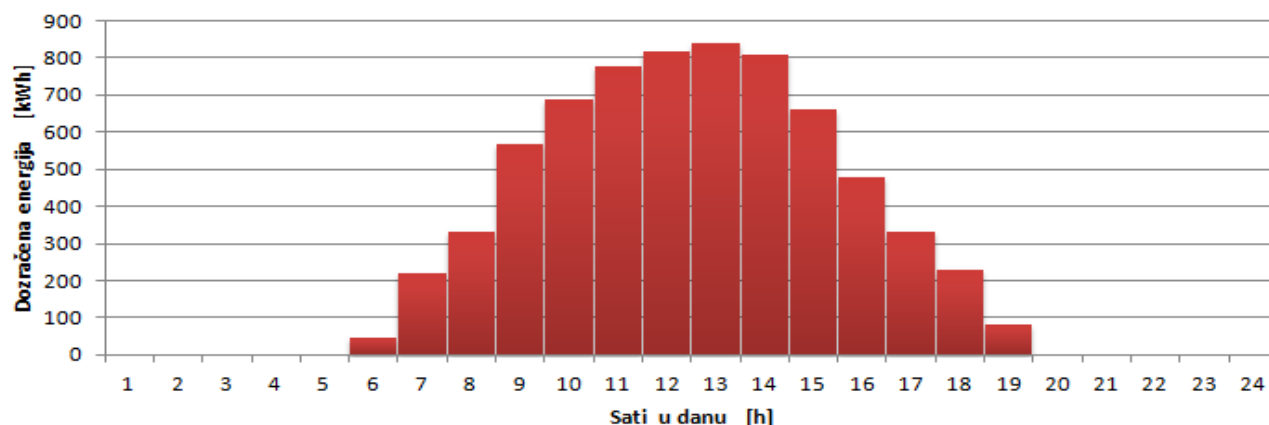
Glavni problemi kod ovoga modela su, odrediti za svaki sat u godini:

- Koliki udio dozračenog toplinskog toka akumuliramo u toplinskom spremniku
- Koliki udio dozračenog toplinskog toka dovodimo na izmjenjivač
- Koliko energije uzimamo iz toplinskog spremnika za generiranje toplinskog toka u izmjenjivaču

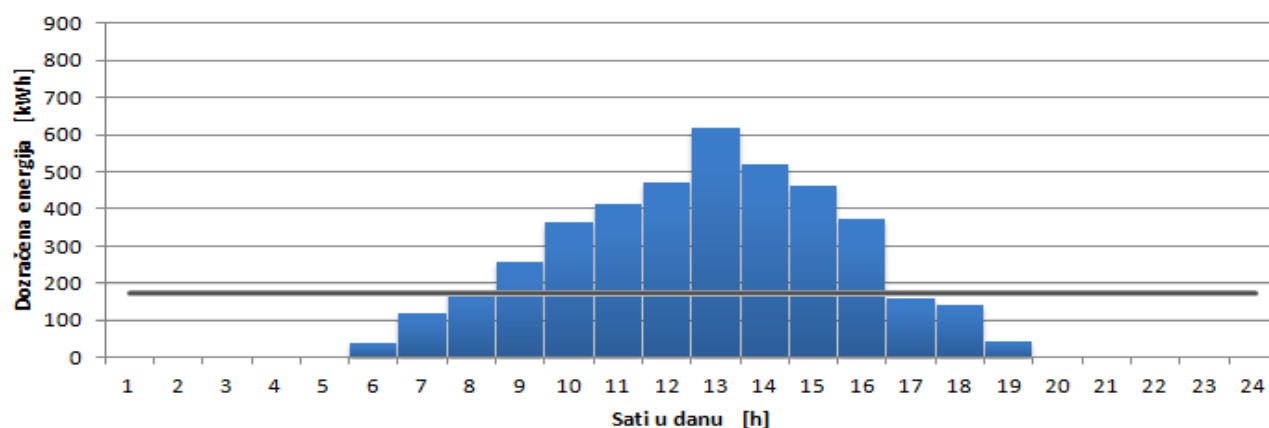
Ovaj pristup baziran na prosječnoj dnevnoj i satnoj dozračenoj energiji od sunca je najlakše objasniti na primjeru.

#### Primjer :

Na dijagramu na slici 20. je prikazana satna raspodjela dozračene toplinske energije za dan 03.08.2009., dok je na dijagramu na slici 21. prikazana prosječna satna dozračena toplinska energija za protekla tri dana od tog datuma. Na slici 21. još je ucrtana i linija prosječne dozračene toplinske energije (siva linija) za ta tri dana koja je ustvari aritmetička sredina između dozračenih toplinskih energija za svaki sat u posljednja tri dana.



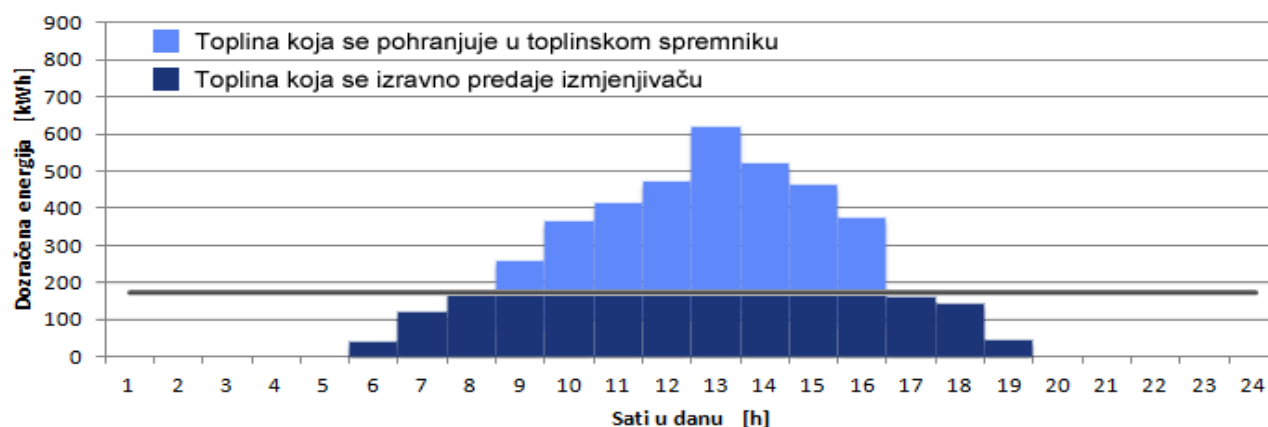
**Slika 20. Satna raspodjela dozračene toplinske energije za dan 03.08.2009.**



**Slika 21. Prosječna satna dozračena toplinska energija, sa srednjom vrijednošću, za protekla tri dana od 03.08.2009.**

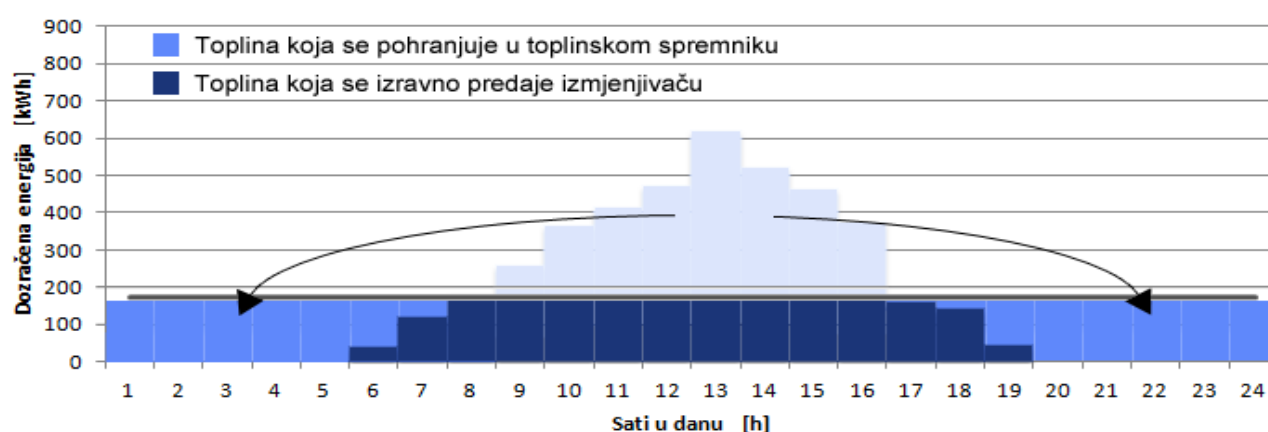
Linija prosječne dozračene toplinske energije, u ovome modelu, predstavlja razdjelnu liniju koja dijeli dijagram prosječne dozračene toplinske energije na dva dijela, kako se može vidjeti na dijagramu na slici 22. Površina dijagrama koja se nalazi ispod linije prosjeka predstavlja količinu topline koja se izravno predaje, od strane kolektora, izmjenjivaču, dok površina dijagrama koja se nalazi iznad linije prosjeka predstavlja količinu topline koja se pohranjuje u toplinskom spremniku.





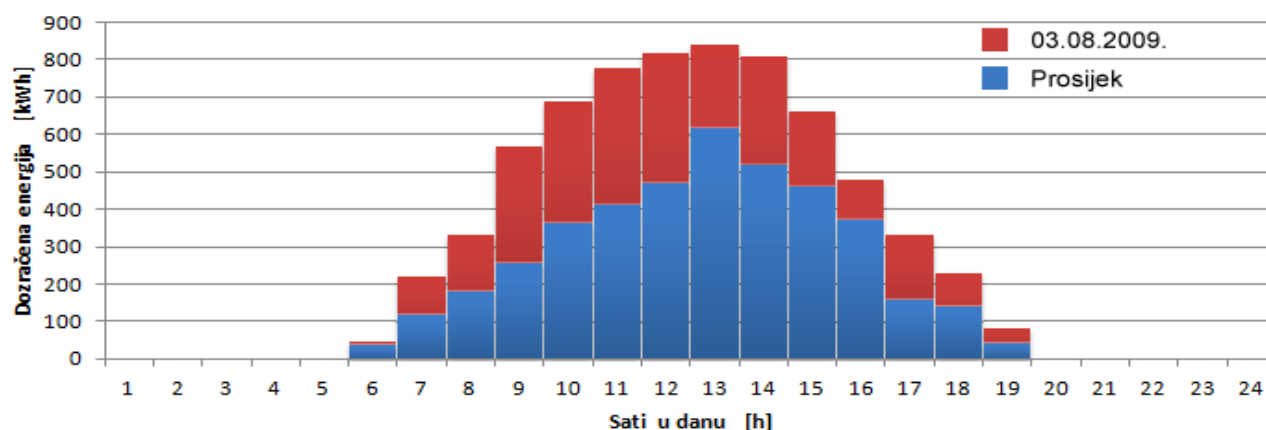
**Slika 22. Određivanje izravno predane topline izmjenjivaču i pohranjuje u toplinskom spremniku**

Osim što određuje koliko se, od prikupljene topline, topline pohranjuje, a koliko izravno iskorištava, linija prosječne dozračene toplinske energije predstavlja i raspoloživi toplinski tok na izmjenjivaču,  $q(1-2)$ , u svakome trenutku, izražen u vatima [W]. Ova tvrdnja je obranjiva jednostavnom translacijom površine dijagrama koja se nalazi iznad linije prosjeka na prazan prostor ispod te iste linije, kako je prikazano na slici 23. Time je dokazano da je u svakome trenutku raspoloživa dovoljna količina energije za pokrivanje predanog toplinskog toka koji određuje linija prosječne dozračene toplinske energije.



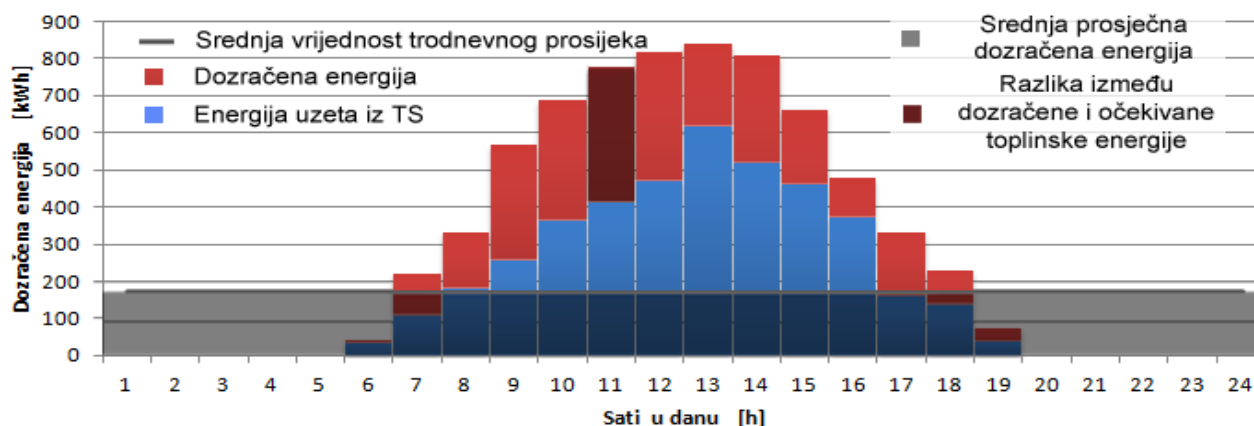
**Slika 23. Dokaz jednakosti pohranjene i raspoložive toplinske energije**

Logično je da prosječne vrijednosti ne mogu biti matematički model jednog dinamičkog i stohastičkog sustava kao što je solarna elektrana. Zbog toga je u ovaj model ugrađena satna korekcija vrijednosti linije prosjeka bazirana na razlici između prosječne vrijednosti dozračene toplinske energije u posljednja tri dana, u satu koji se trenutno razmatra i trenutne vrijednosti. Što se pod time misli najbolje se vidi preklapanjem dijagrama tj. slika 20. i 21.



**Slika 24. Usporedni dijagram prosječne i stvarne insolacije**

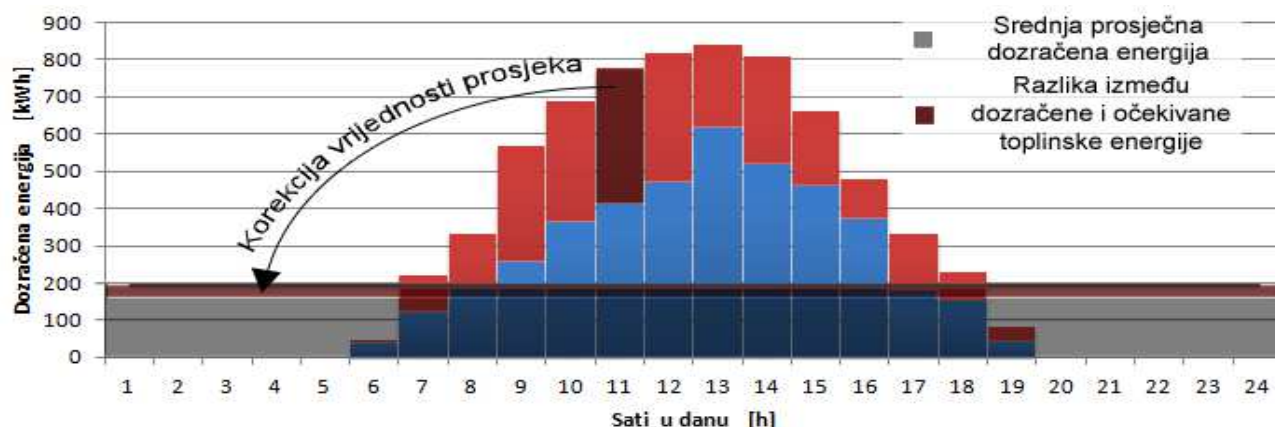
Ako na slici 24. promatramo, na primjer, 11. sat u danu, možemo vidjeti da je ukupna dozračena energija u 11. satu 03.08.2009. za 361,33 kWh veća od prosječne dozračene energije u 11. satu protekla tri dana. Pomoću te razlike se obavlja satna korekcija prosjeka, što je najlakše prikazati na primjeru sljedećih slika. Slika 25. pokazuje točno o kojim površinama se ovdje govori. Srednja prosječna dozračena energija je reprezentirana zasjenjenom površinom ispod linije prosječne vrijednosti dok je razlika između dozračene i očekivane toplinske energije ozračena tamno crveno.



**Slika 25. Prikaz toplinskih energija**

$$Q = q t \quad [Wh = W \times h] \quad (5.2.1)$$

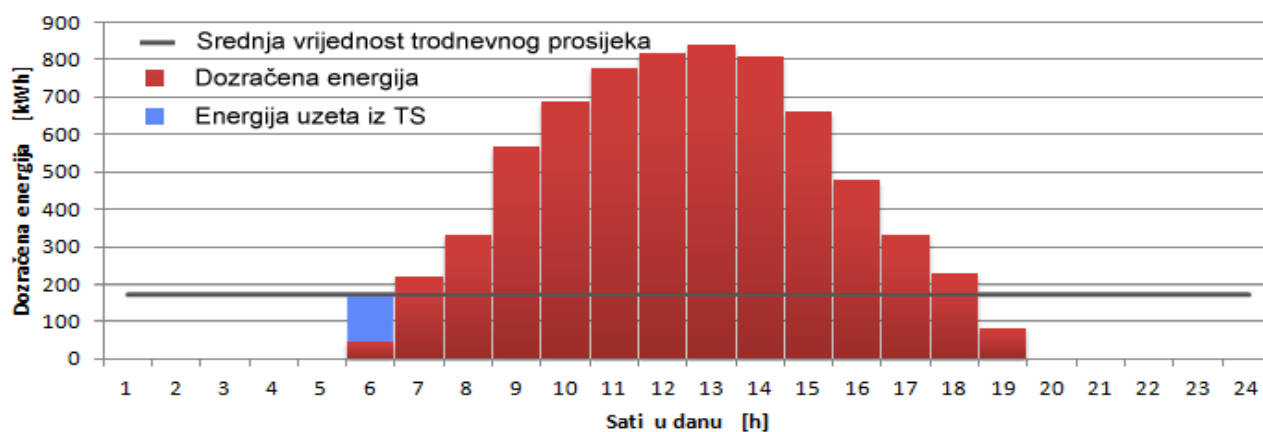
U svim ovim dijagramima je prikazana ovisnost toplinskog toka (prikazana na ordinati i kW) i vremena (prikazanog na apcisi u satima). Budući da se toplinska energija može dobiti kao umnožak toplinskog toka i vremena, kako je prikazano jednadžbom 5.2.1, proizlazi da površina ispod dijagrama predstavlja toplinsku energiju. Stoga se, budući da obje predstavljaju toplinsku energiju, kompletna površina ispod linije prosjeka i površina koja predstavlja razliku između srednje satne i dozračene energije u jednome satu mogu zbrajati. Zbrajanjem tih dvaju površina dolazi do povećanja ukupne površine, što se može vidjeti na slici 26. te se linija prosječne dozračene toplinske energije diže prema gore. Dizanjem linije prosjeka dolazi do povećavanja toplinskog toka predanog na izmjenjivaču, te se, ovisno o novome položaju linije, mijenja udio dozračene topline koja se pohranjuje u toplinskom spremniku i koja se izravno predaje izmjenjivaču topline u tom satu.



**Slika 26. Grafički prikaz utjecaja razlike očekivane i dozračene energije na korekciju vrijednosti linije prosjeka**

U slučaju da je dozračena toplinska energija u trenutnom satu manja od prosječne satne dozračene energije za protekla tri dana, razlika će imati negativan predznak zbog čega će linija prosjeka padati.

Još je potrebno reći kako je u ovome modelu riješeno pražnjenje toplinskog spremnika. To je, ponovno, lakše objasniti pogledom na sliku. Na slici 22. se može uočiti dijagram dozračene energije s ucrtanom linijom srednje vrijednosti trodnevnog prosjeka. Ovdje je potrebno obratiti pažnju na 6. sat u danu. U tome satu je također potrebno isporučiti toplinski tok, koji po iznosu odgovara liniji prosjeka, toplinskom izmjenjivaču, iako dozračena energija nije dovoljna za pokrivanje tog toplinskog toka. Stoga će se dio toplinske energije za pokrivanje potrebnog toplinskog toka morati povući iz toplinskog spremnika. Tu energiju također određuje prosječna dozračena toplinska energija tako što je ta energija određena površinom između dozračene energije i linije prosjeka u tom satu.

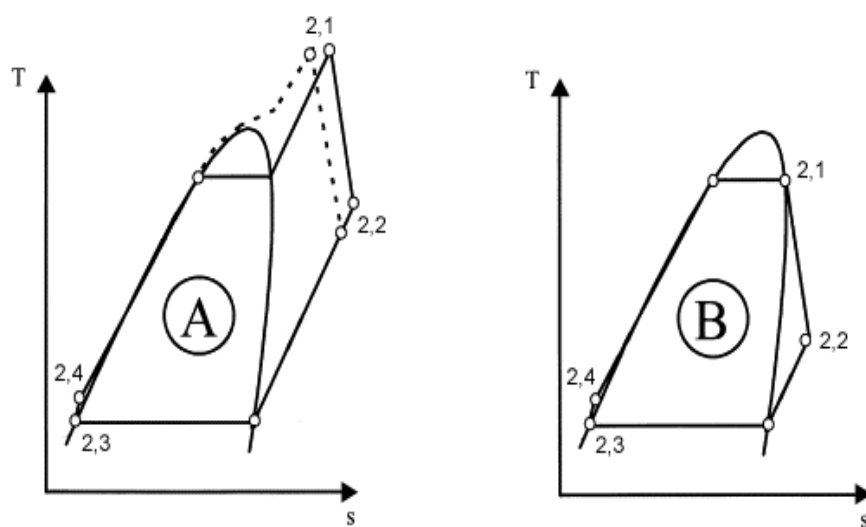


**Slika 27. Određivanje energije koja se odvodi iz toplinskog spremnika za snabdijevanje energetskih potreba postrojenja**

Ovaj se algoritam mora provoditi za svaki sat tokom simulacije rada postrojenja te su njime određene sve potrebne izlazne veličine potrebne za satnu simulaciju primarnog kruga ovoga postrojenja.

### 6.3. Matematički model sekundarnog kruga

Matematički model sekundarnog kruga je ustvari matematički model Rankinovog ciklusa. Pri modeliranju matematičkog modela organskog Rankinovog ciklusa mora se paziti na razlike između organskog i parnog Rankinovog ciklusa koje su navedene u poglavlju 5.2.2.



**Slika 28. T-s dijagrama organskog Rankinovog ciklusa za primjenu pri visokim (A) i niskim (B) temperaturama [10]**

Na slici 28. prikazani su T-s dijagrami organskog Rankinovog ciklusa za primjenu pri visokim (A) i niskim (B) temperaturama. Promatrajući T-s dijagram organskog Rankinovog ciklusa, može se uvidjeti jedna značajna razlika u odnosu na T-s dijagram parnog Rankinovog ciklusa klasičnih elektrana. Ta razlika se krije u položaju točke završetka ekspanzije. Naime, ona se ovdje nalazi duboko u području pregrijane pare i na izobari, dok kod parnog Rankinovog ciklusa pada blizu linije suho-zasićene vodene pare, često u području vlažne pare. Ova razlika nastaje zbog pozitivnog nagiba linije suho-zasićene pare organskog medija dok linija ekspanzije u idealnom slučaju može imati minimalno nulti prirast entropije.

U daljnjem tekstu ovoga poglavlja biti će opisan matematički model baziran na nomenklaturi zadanoj dijagramom A na slici 22. koja je preuzeta iz slike 18.

### **6.3.1. Algoritam**

Prije daljnjeg objašnjenja treba navesti koje veličine su već prije zadane i određene, da se zna koje se veličine treba izračunati u sklopu algoritma.

- Zadane konstante su:  $T(2,1)$  i  $p(2,1)$
- Određene konstante su:  $T(2,3)$
- Određene varijable:  $q(1-2)$

Sustav je dizajniran kao sustav s konstantnim (zadanim) temperaturama te se stoga iz toplinskog toka dobivenog na izmjenjivaču i temperatura izračunava maseni protok radne tvari. Zbog nepoznate entalpije medija po izlasku iz napojne pumpe i nepoznatog prirasta entropije medija prolaskom kroz napojnu pumpu, u prvoj iteraciji je potrebno pretpostaviti temperaturu u točki 2,4 -  $T(2,4)$ , koja će se na kraju svakog kruga unutar iteracije korigirati na stvarnu vrijednost.

#### Algoritam modela izmjenjivača topline:

- Budući da se točka 2,1 i 2,4 nalaze na izobari proizlazi da je tlak u točki 2,4 jednak zadanom tlaku u točki 2,1:

$$p(2,4) = p(2,1)$$

- Iz pretpostavljene temperature  $T(2,4)$  i tlaka  $p(2,4)$  uporabom toplinskih tablica može se dobiti entalpija  $h(2,4)$ :

$$h(2,4) = f(T(2,4), p(2,4))$$

- Iz zadane temperature i tlaka u točki 2,1 pomoću toplinskih tablica se dođe i do entalpije i entropije medija u toj točki:

$$h(2,1) = f(T(2,1), p(2,1))$$

$$s(2,1) = f(T(2,1), p(2,1))$$

- Kada su poznate entalpije  $h(2,4)$  i  $h(2,1)$ , iz njih i dovedenog toplinskog toka iz primarnog kruga  $q(1-2)$  koristeći jednadžbu 6.3.1.1 dobije se maseni protok organskog radnog medija  $q_{m,orm}$ .

$$q_{m,orm} = \frac{q(1-2)}{h(2,1) - h(2,4)} \quad (6.3.1.1)$$

Izmjenjivač napušta medij temperature  $T(2,1)$  i tlaka  $p(2,1)$  masenim protokom  $q_{m,orm}$  te takav ide na ulaz turbine.

#### Algoritam modela turbine:

- Tlak  $p(2,3)$  se može dobiti preko temperature  $T(2,3)$ , određene načinom hlađenja kondenzatora i temperature medija kojim se hladi, jednostavnim isčitavanjem vrijednosti tlaka na liniji vrele kapljevine za temperaturu  $T(2,3)$ :

$$p(2,3) = f(T(2,3))$$

- Zbog iste izobare na kojoj se nalaze tlak u točki 2,2 je jednak tlaku u točki 2,3:

$$p(2,2) = p(2,3)$$

- Zbog prirasta entropije prilikom ekspanzije radnog medija u turbini, u matematički model turbine moramo uračunati stupanj korisnosti. Povlačeći izentropu iz točke 2,1, na presjecištu sa izobarom  $p(2,3) = p(2,2) = \text{konst.}$  dobivamo novu točku

2,2i. Zbog položaja točke, na izobari i izentropi, tlak  $p(2,2i)$  je jednak tlaku  $p(2,3)$  te entropija  $s(2,2i)$  je jednaka entropiji u točki 2,1:

$$p(2,2i) = p(2,3)$$

$$s(2,2i) = s(2,1)$$

Iz ta dva podatka može se doći do temperature  $T(2,2i)$  te do entalpije  $h(2,2i)$ :

$$T(2,2i) = f(p(2,2i), s(2,2i))$$

$$h(2,2i) = f(T(2,2i), p(2,2i))$$

Iz čega koristeći jednadžbu 6.3.1.2, i podatak o stupnju korisnosti turbine, lako dođe do vrijednosti entalpije radnog medija u točki 2,2.

$$h(2,2) = h(2,1) - \eta_{turbine} \times (h(2,1) - h(2,2i)) \quad (6.3.1.2)$$

- Iz dobivenih podataka je, prema jednadžbi 6.3.1.3 jednostavno dobiti snagu na turbini, te na kraju, koristeći podatke o koeficijentima mehaničkih gubitaka i korisnosti električnog generatora, prema jednadžbi 6.3.1.4 i do izlazne električne snage električnog generatora.

$$P_{turbine} = q_{m,orm} \times (h(2,1) - h(2,2)) \quad (6.3.1.3)$$

$$P_{el} = P_{turbine} \times \eta_{meh} \times \eta_{el} \quad (6.3.1.4)$$

- Da bi se dobila izlazna električna snaga elektrane trebaju se od izlazne snage električnog generatora oduzeti snage svih potrošača unutar elektrane.

Poslije dobivanja snage kroz ekspanziju, potrebno je još zatvoriti kružni proces preko kondenzatora i napojne pumpe.

#### Algoritam modela kondenzatora:

- Što se kondenzatora tiče potrebno je još samo dobiti vrijednosti entalpije i entropije u točki 2,3 kako bi mogli izračunati odvedeni toplinski tok. Entalpija



$h(2,3)$  i entropija  $s(2,3)$  se lako očitaju iz toplinskih tablica kao vrijednosti na liniji vrele kapljevine za temperaturu  $T(2,3)$ :

$$h(2,3) = f(T(2,3))$$

$$s(2,3) = f(T(2,3))$$

- Nakon toga je jednostavno dobiti odvedeni toplinski tok koristeći jednadžbu 6.3.1.5.

$$q_{kondenzatora} = q_{m,orm} \times (h(2,2) - h(2,3)) \quad (6.3.1.5)$$

#### Algoritam modela napojne pumpe:

- Sličan algoritam koji se koristio kod turbine za modeliranje prirasta entropije, koristi se i ovdje, budući da se, matematički, turbina i pumpa razlikuju samo u smjeru energetskog toka (kod turbine energija se odvodi od fluida, a kod pumpe se ona dovodi fluidu) i načinu uzimanja u obzir njene korisnosti (kod turbine razlika entalpija se množi sa  $\eta$ , a kod pumpe se dijeli s  $\eta$ ). Pa tako je ovdje definirana izentropska točka - 2,4i. Pomoću položaja te točke određuju se veličine koje vladaju u toj točki:  $s(2,4i)$ ,  $p(2,4i)$ ,  $T(2,4i)$  i  $h(2,4i)$ . Iz tih se veličina pomoću formule 6.3.1.6 odredi entalpija radnog medija u točki 2,4, da bi se na kraju prema jednadžbi 6.3.1.7 dobila posljednja snaga potrebna u ovome modelu - snaga potrebna za pogon napojne pumpe.

$$h(2,4) = h(2,3) + \frac{h(2,4i) - h(2,3)}{\eta_{np}} \quad (6.3.1.6)$$

$$P_{np} = q_{m,orm} \times (h(2,4) - h(2,3)) \quad (6.3.1.7)$$

- Još je ostalo za odrediti temperaturu  $T(2,4)$ , koja se pretpostavlja na početku prve iteracije, da bi se zamijenila s njenom pravom vrijednosti. Ovo je lako za napraviti budući da se ona očita iz toplinskih tablica, za upotrijebljeni radni medij, za unesene vrijednosti  $p(2,4)$  i  $h(2,4)$ :

$$T(2,4) = f(p(2,4), h(2,4))$$

## 7. IZBOR MEDIJA SEKUNDARNOG KRUGA

Izbor radnog medija organskog Rankinovog ciklusa je izveden u gore opisanom matematičkom modelu. Model je napisan u Visual BASIC programskom jeziku te je satno iteriran u Microsoft VBA (Microsoft Visual Basic for Applications) verziji Visual BASICa integriranoj u Microsoft Office programski paket.

Detaljnije o simulacijama će biti govora u poglavlju 8. ovoga rada.

Najpovoljniji medij je izabran između medija za koje su podatci sadržani unutar REFPROP programa koji nam je služio kao baza podataka. Stoga je u izbor, od 6 medija navedenih u poglavlju 5.2.1, ušlo 3, a to su:

- HFC - 134a (puni naziv: 1,1,1,2-tetrafluoroetan)
- HFC - 245fa (puni naziv: 1,1,1,3,3-pentafluoropropan)
- Toluene (puni naziv: metilbenzen)

Izbor najboljeg radnog medija za ovu uporabu je proveden na bazi najveće iskoristivosti procesa pri čemu je vrijednost za sve korisnosti unutar modela uzeta vrijednost 1, tj. 100%. Ulazni podatci su korišteni kako je navedeno u poglavlju 6.1. U tablici 7. mogu se vidjeti dobiveni rezultati korisnosti, na temelju ovog matematičkog modela, za svaki od navedenih medija.

**Tablica 7. Simulacijom dobivene korisnosti postrojenja za izabrane radne medije**

Medij	Puno ime	Korisnost postrojenja
HFC - 134a	1,1,1,2-tetrafluoroethane	0,115176345
HFC - 245fa	1,1,1,3,3-pentafluoropropane	0,181856558
Toluene	Methylbenzene	0,109791894

Iz dobivenih rezultata je jasno vidljivo da ovo postrojenje daje najveću korisnost, za zadane ulazne podatke, prilikom uporabe organskog medija HFC - 245fa, te će daljnje simulacije biti izvedene uporabom upravo tog medija.

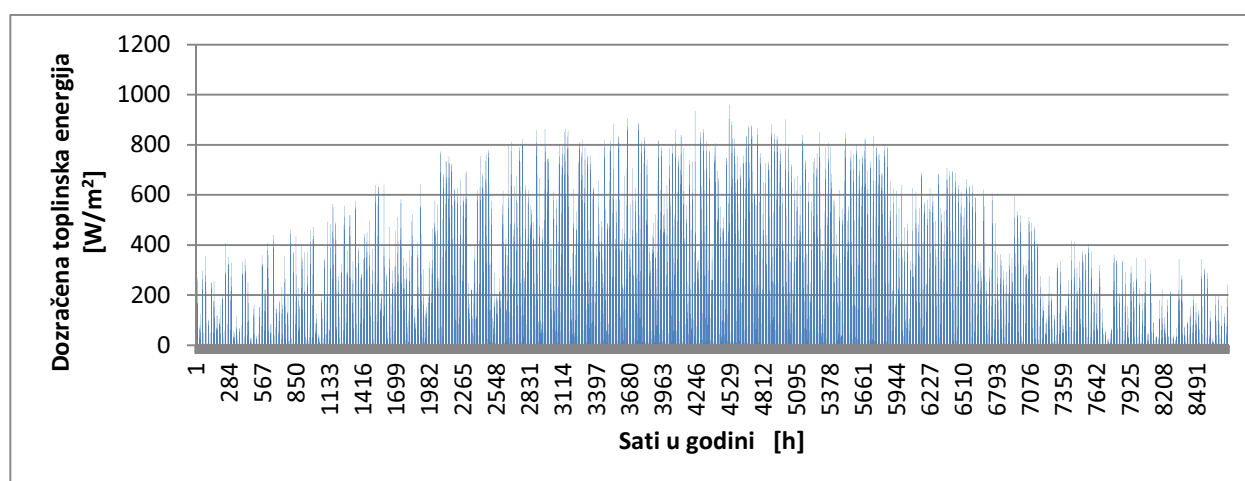
## 8. SIMULACIJE RADA ELEKTRANE

U ovome poglavlju su opisani rezultati svih simulacija zadanih zadatkom. Simulacije su bazirane na prethodno opisanom matematičkom modelu te su izvedene pomoću Microsoft Excel-a i Microsoft Visual Basic for Applications (VBA) programa koji omogućava integraciju programskog koda pisanog u programskom jeziku Visual BASIC u Microsoft Excel.

Budući da se većina matematičkog modela oslanja na podatke iz toplinskih tablica, kao bazu podataka, iz koje se pri izvođenju matematičkog modela vade podatci, korišten je program REFPROP, koji je moguće ugraditi u Excel i VBA. U njemu su sadržani svi potrebni podatci za izvođenje programa.

### 8.1. Satna simulacija rada solarne elektrane

Kao ulazni podatci o dozračenju količini energije za satnu simulaciju upotrijebljeni su podatci o satnoj insolaciji za 2009. godinu za područje Grada Zagreba – slika 29.



**Slika 29. Satna dozračena toplinska energija kroz godinu**

U ovoj simulaciji ćemo vidjeti ponašanje izvedenog matematičkog modela prilikom njegova izvrgavanja realnim izmjenama intenziteta sunčevog zračenja.

Simulirano je postrojenje s dnevnim toplinskim spremnikom, po matematičkom modelu opisanom u poglavlju 6. ovoga rada, te je ujedno simulirana i vremenski ovisna napunjenost, po matematičkom modelu, dnevnog toplinskog spremnika.

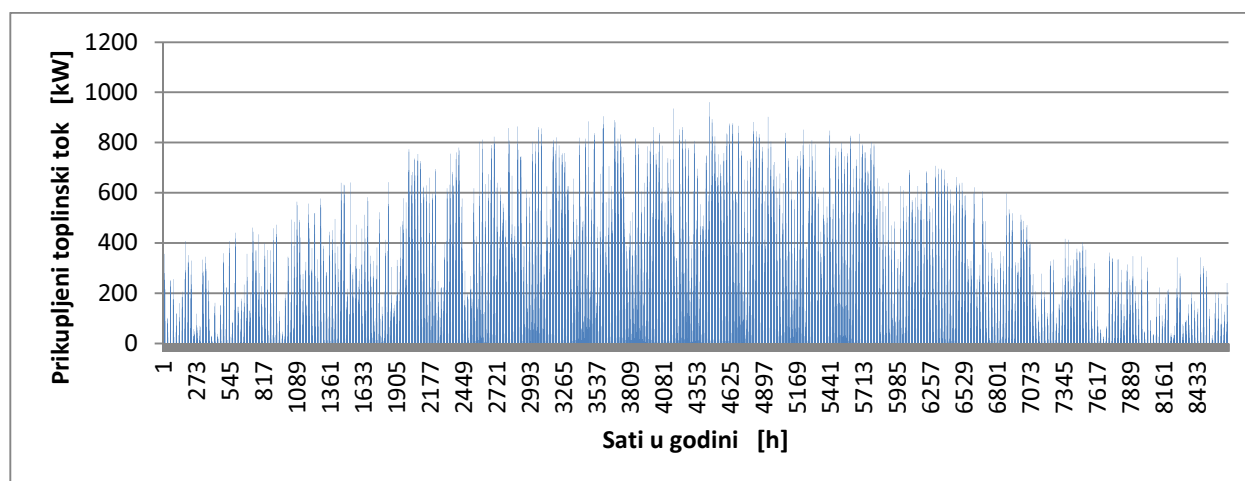
Osim ulaznih parametara koji su pobrojeni u poglavlju 6.1. prije prikaza rezultata simulacija potrebno je navesti još jedan parametar koji je upotrijebljen u ovoj simulaciji, a to je temperatura medija na ulasku u napojnu pumpu. Ova veličina je određena načinom hlađenja kondenzatora i temperaturom medija kojim se hladi. Zbog toga ćemo uzeti da je ta temperatura konstantna i jednaka 35°C.

Prikupljeni toplinski tok [ $q_{\text{prikupljeno}}$ ] s kojim raspolaže solarno postrojenje dobije se kao umnožak dozračene toplinske energije i površine kolektora [A], prema formuli 8.1.1.

$$q_{\text{prikupljeno}} = q_{\text{dozračeno}} \times A \quad (8.1.1)$$

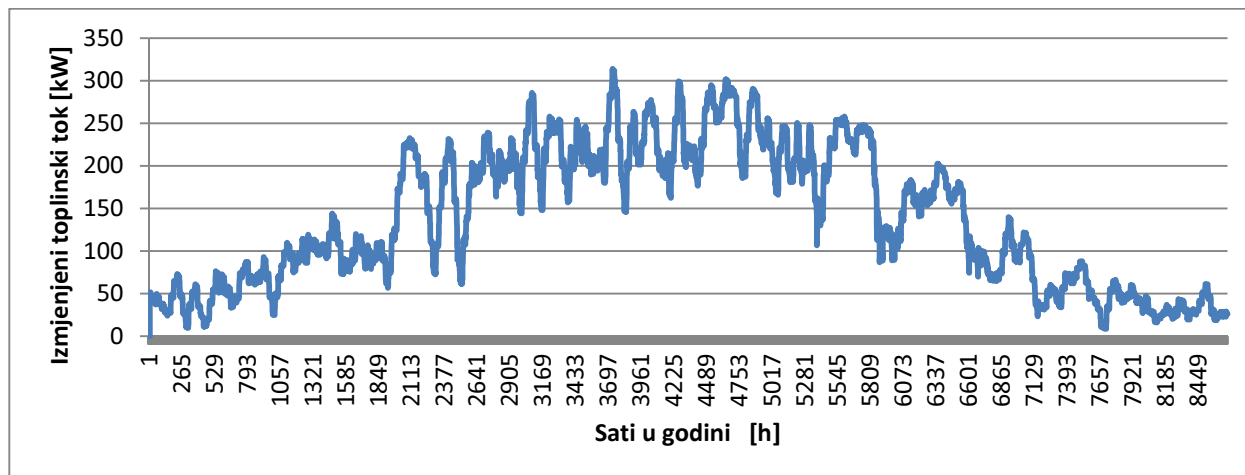
Za površinu kolektora za prikupljanje dozračene toplinske energije postrojenja simuliranog u ovome radu uzeta je vrijednost od 1000 m<sup>2</sup> koja će biti konstantna kroz ostatak ovoga rada.

Upotrebljavajući formulu 8.1.1, dozračenu toplinsku energiju i površinu kolektora od 1000 m<sup>2</sup> simulacija daje podatke o prikupljenom toplinskom toku čiji je grafički prikaz prikazan dijagramom na slici 30.



**Slika 30. Prikupljeni toplinski tok kroz godinu**

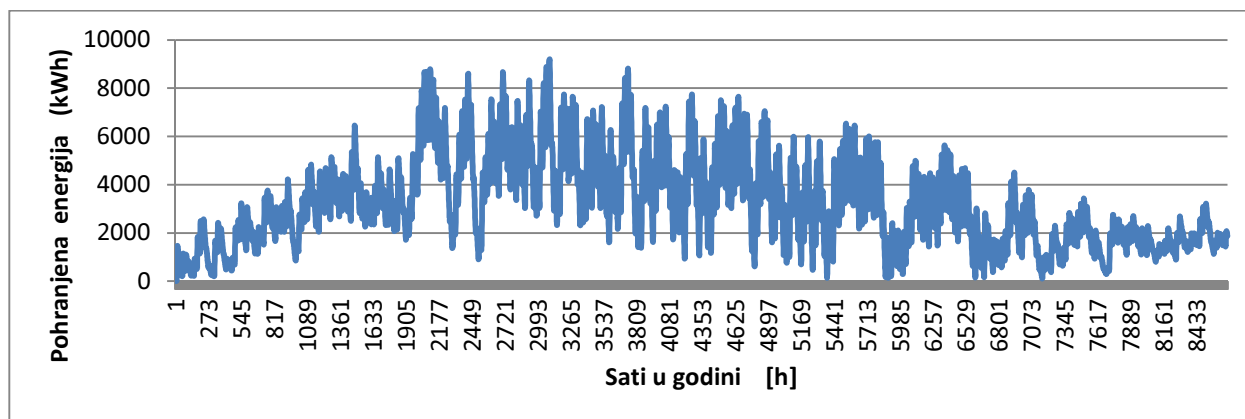
Iz prikupljenog toplinskog toka, kao ulazne varijable, simuliran je rad cijelog postrojenja. Na dijagramu na slici 31. se mogu vidjeti vremenski ovisne oscilacije raspoloživog toplinskog toka na izmjenjivaču.



**Slika 31. Raspoloživi toplinski tok na izmjenjivaču topline kroz godinu**

Pogledom na sliku 31. može se utvrditi da je postignuta kontinuiranost u predaji toplinske energije organskom Rankinovom ciklusu, što se i traži zadatkom.

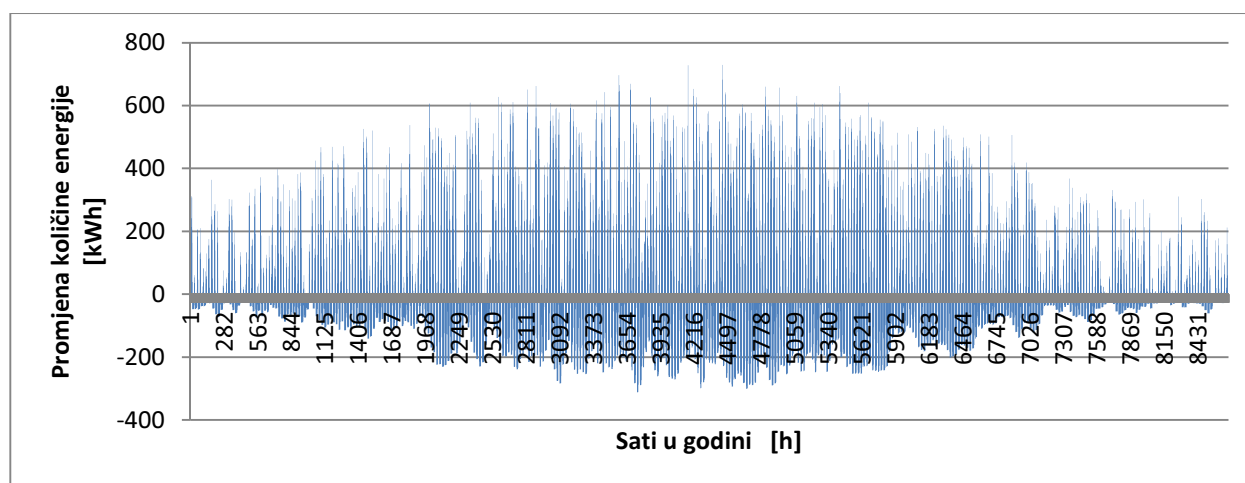
Vremenski ovisan raspoloživi toplinski tok na izmjenjivaču, koji se predaje organskom Rankinovom ciklusu, je ovisan, kako o prikupljenom toplinskom toku, tako i trenutno o pohranjenoj toplinskoj energiji u spremniku energije. Stoga je potrebno prikazati ovisnost pohranjene toplinske energije, u toplinskom spremniku, o vremenu - slika 32.



**Slika 32. Pohranjena toplinska energija u TS**

U dijagramu pohranjene toplinske energije u toplinskom spremniku vidimo kretanje napunjenosti spremnika. To se još bolje može vidjeti ako se pogleda dijagram na slici 33. koji prikazuje promjenu količine energije (dovedenu/odvedenu energiju) u svakome satu.

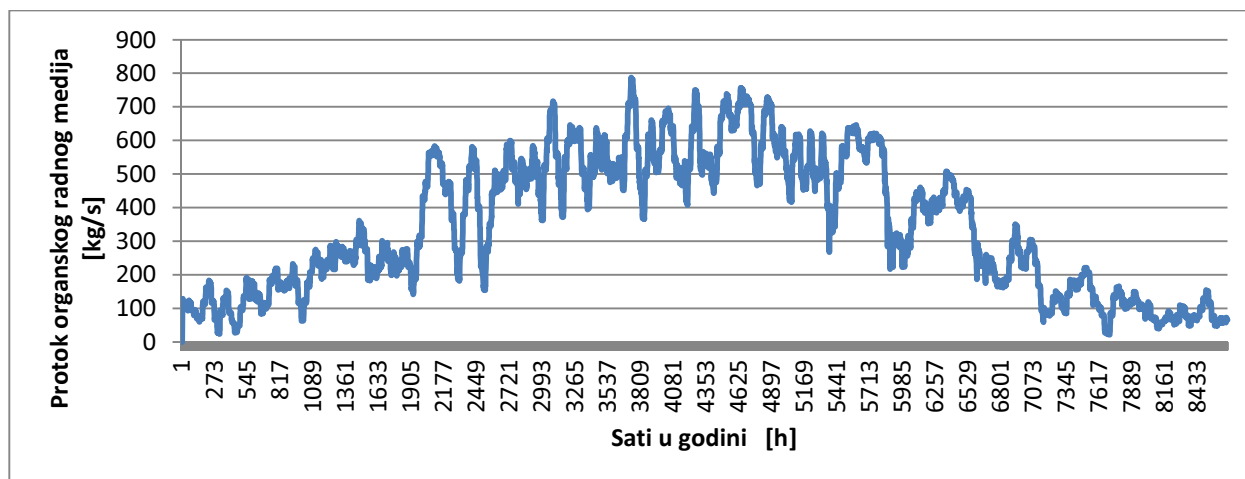
Ako gledamo maksimume pohranjene energije u spremniku tokom dana vidjeti ćemo da se ona kreće oko iznosa ukupne prikupljene energije u tom danu. Stoga vidimo da ovaj spremnik možemo nazivati dnevnim toplinskim spremnikom. Ukoliko dalje interveniramo, jednostavnim matematičkim korekcijama, u matematički model možemo dodatno smanjiti potrebnu količinu pohranjene energije u toplinskom spremniku ali, zbog uvjeta za kontinuiranom proizvodnjom struje, to će dovesti do puno većih oscilacija u predanom toplinskom toku sekundarnom krugu. Budući da ovaj rad teži, uz kontinuiranu, što konstantnijoj proizvodnji takve korekcije su izbjegavane.



**Slika 33. Satna promjena količine energije u TS**

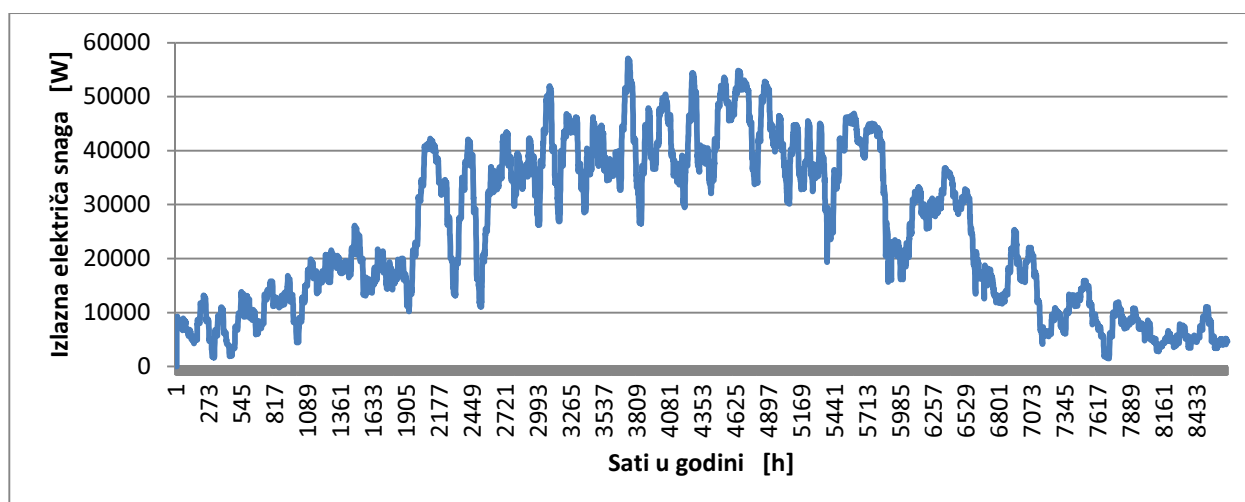
Osim primarnog kruga, moramo razmotriti i izlazne podatke sekundarnog kruga koje daje simulacija uporabom ovoga matematičkog modela, a to su protok organskog medija i izlazna električna snaga.

Protok organskog radnog medija je, zbog zadane konstantne temperature pare na ulazu u turbinu, usko vezan uz toplinski tok dovođen Rankinovom ciklusu. Ponašanje protoka organskog radnog medija u vremenu se može vidjeti na slici 34.



**Slika 34. Ponašanje vrijednosti protoka organskog radnog medija kroz godinu**

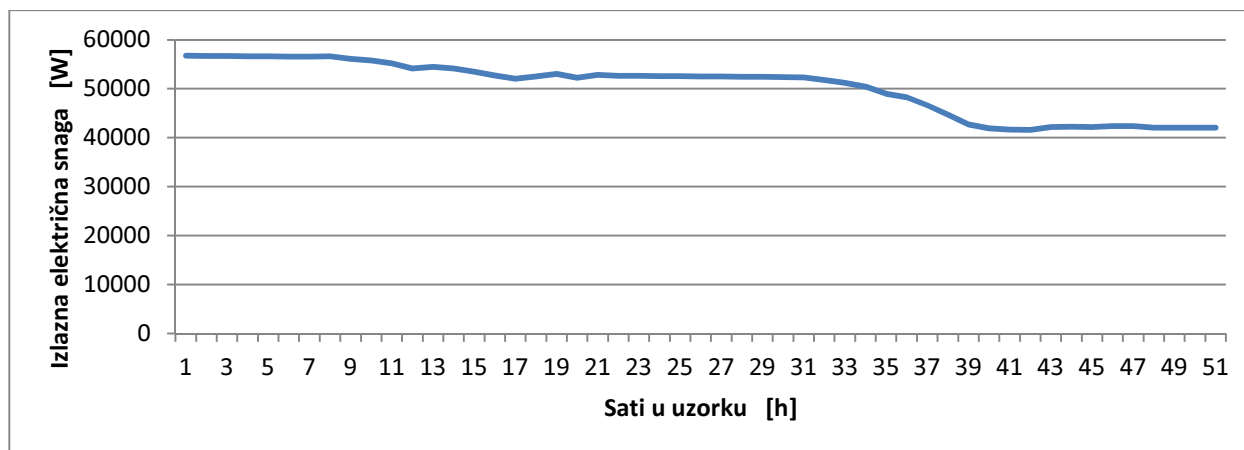
Uzimajući u obzir sve prethodno dobivene podatke, kao izlazna varijabla, dobivena iz simulacije, se može dobiti i izlazna električna snaga postrojenja.



**Slika 35. Kretanje izlazne električne snage postrojenja**

Slika 35. prikazuje raspodjelu izlazne električne snage ove elektrane kroz godinu. Na prvi pogled se može vidjeti da je dijagram vrlo sličan dijagramu protoka organskog medija. To je tako jer je i izlazna snaga električnog generatora i snaga potrebna za pogon napojne pumpe izravno ovisna o protoku organskog radnog medija, a izlazna snaga postrojenja je jednaka razlici dobivene električne snage na električnom generatoru umanjenoj za sve interne električne konzume same elektrane.

Po dijagramu izlazne električne snage bi se moglo zaključiti da su promjene u izlaznoj snazi postrojenja vrlo oštre, međutim to nije tako. Taj se dojam stječe zbog sabijanja inače vrlo duge ordinate koordinatnog sustava na malu širinu papira. To se može i dokazati povećavanjem dijela koordinatnog sustava. Na slici 36. može se vidjeti uvećani dio gore prikazanog dijagrama. To je dio od 3815 do 3865 sata u godini koji prema dijagramu na slici 35. predstavlja jedno od najstrmijih područja u dijagramu.



**Slika 36. Uvećani segment izlazne električne snage postrojenja**

Na ovako uvećanom segmentu možemo vidjeti da, kada se gleda satna promjena snage, to nisu oštre promjene koje turbina ne bi mogla podnijeti.

Iz podataka o toplinskoj energiji izmijenjenoj na izmjenjivaču,  $Q_{(1-2)} = 1.205.224.382$  Wh i o količini isporučene električne energije u mrežu,  $E_{\text{električno}} = 218.673.404,5$  Wh, po jednadžbi 8.1.2, dobije se da je iskoristivost ovoga postrojenja 18,19 % za slučaj izentropskih ekspanzija i kompresija te rada bez gubitaka.

$$\eta = \frac{E_{\text{električno}}}{Q_{(1-2)}} \quad (8.1.2)$$

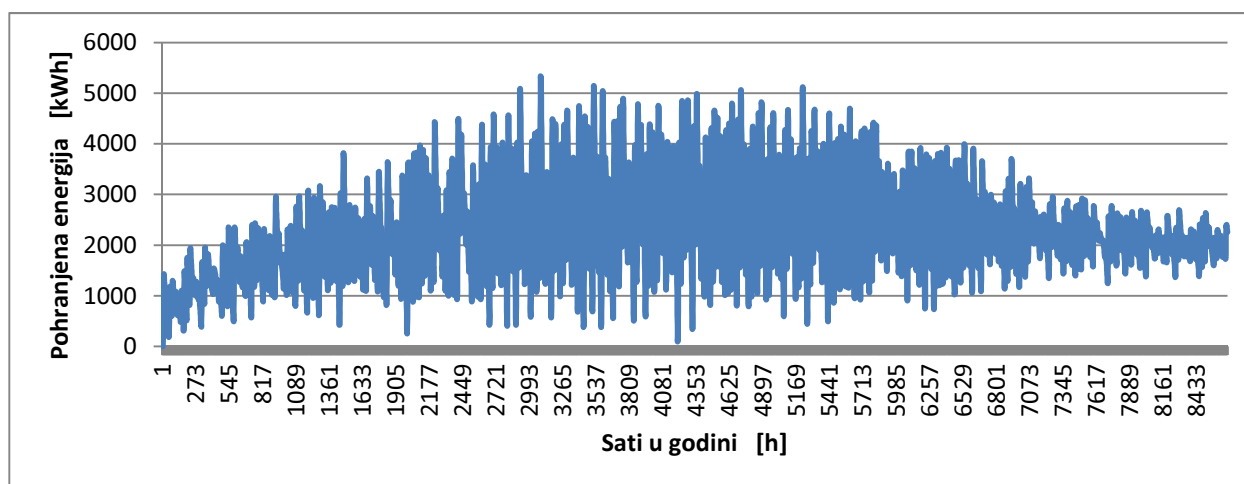
Jednostavnim dijeljenjem iznosa isporučene električne energije u mrežu i broja sati u godini dobije se i prosječna izlazna snaga od 25,228 kW za solarnu termoelektiranu površine kolektora 1000 m<sup>2</sup>.



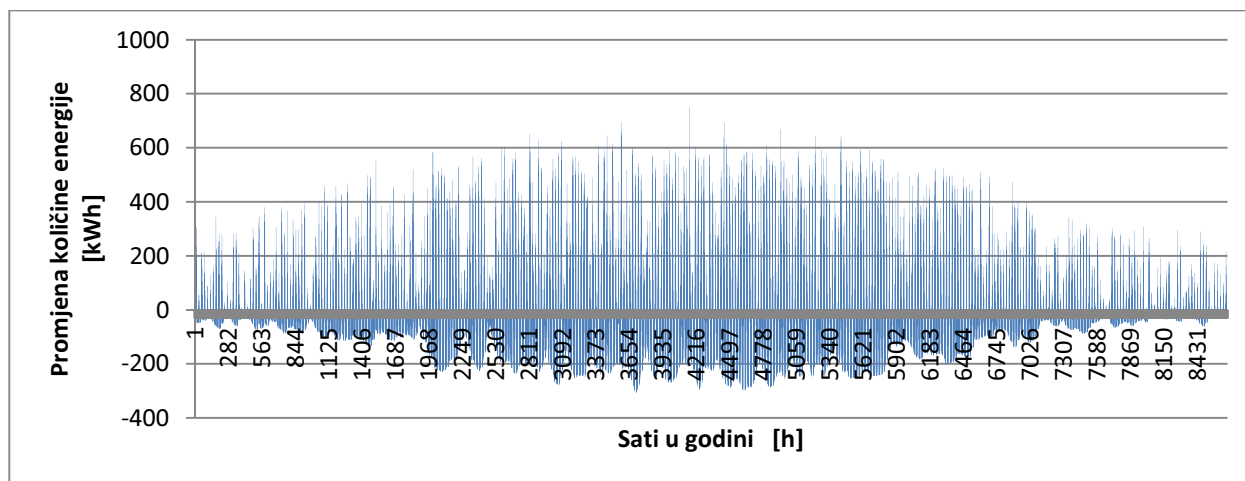
## 8.2. Uporaba kratkotrajne prognoze

Ako se prije izvedeni i upotrijebljeni matematički model izmjeni da za izračun prosječnih dnevnih i satnih vrijednosti, na kojima se bazira, umjesto zadnja tri dana, koristi podatke iz prethodnog, aktualnog i sljedećeg dana koristeći podatke sadržane u kratkoročnoj prognozi vremena, moguće je postići značajne uštede po pitanju potrebne veličine toplinskog spremnika. Kratkoročna prognoza vremena se smatra dovoljno točnom te se podatci dobiveni ovom metodom ne bi trebali značajnije razlikovati od stvarnih podataka, a ako bi i došlo do odstupanja ostali stvarni podatci koji se koriste za izračun aritmetičke sredine ublažavaju utjecaj tog odstupanja. Stoga ćemo za simulaciju prognoze, u ovome radu kao prognozu koristiti stvarne poznate podatke, te na taj način provjeriti moguće uštede.

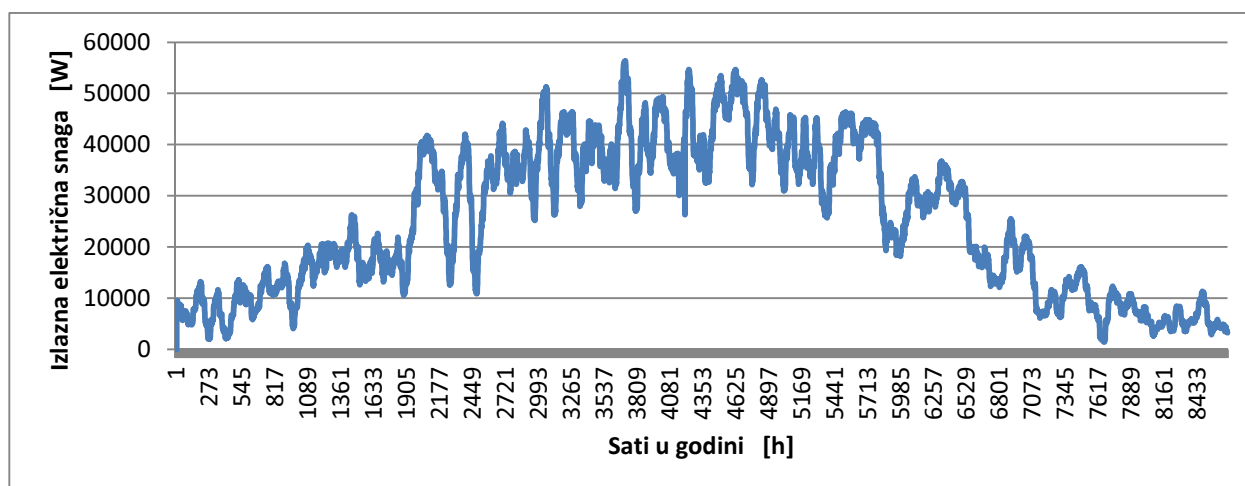
Na iduća tri dijagrama, na slikama 37., 38., 39., mogu se vidjeti podatci o vremenskoj ovisnosti: pohranjene toplinske energije, promjene pohranjene toplinske energije i izlazna električna snaga postrojenja.



**Slika 37. Pohranjena toplinska energija u TS za model s prognozom vremena**



**Slika 38. Satna promjena količine energije u TS za model s prognozom vremena**



**Slika 39. Izlazna električna snaga postrojenja za model s prognozom vremena**

Uspoređujući dijagrame za slučaj simulacije bez uporabe prognoze i dijagrame za slučaj u kojem je upotrijebljena prognoza dijagrama može se uvidjeti značajno smanjenje za maksimalnom količinom pohranjene energije. Razlika u maksimalnim potrebama za spremljenom energijom vidljiva je u tablici 8.

**Tablica 8. Razlika u maksimalnim potrebama za pohranom energije sa i bez uporabe prognoze vremena**

	Maksimalna spremljena energija
Bez prognoze:	9201,99 kWh
S prognozom:	5332,64 kWh
Razlika:	3869,35 kWh

Iz podataka iz tablice 8. slijedi da su se uporabom kratkotrajne prognoze potrebe za maksimalnom spremljenom energijom smanjile za čak 42,05 %. Ostali rezultati, kao što je moguće i vidjeti iz dijagrama, se nisu značajnije promijenili.

## 9. ODREĐIVANJE POTREBNIH VELIČINA TOPLINSKIH SPREMNIKA

Potrebna veličina toplinskog spremnika se određuje prema potrebnoj maksimalnoj toplinskoj energiji koju je potrebno pohraniti tokom godine da bi se postigao kontinuirani rad solarne elektrane. Kada je poznata potrebna toplinska energija, koju je potrebno pohraniti, koristeći toplinski kapacitet izabranog radnog fluida primarnog kruga može se dobiti minimalna potrebna zapremnina toplinskog spremnika. Budući da je za uporabu u postrojenju obrađenom u ovome radu zamišljen spremnik koji se sastoji samo od jedne posude te koristi samo razliku u gustoći vrućeg i hladnog fluida za separaciju tih dvaju fluida, potrebno je uračunati određeni faktor miješanja u proračun potrebne volumenske zapremnine spremnika. Zbog toga ćemo potrebnu veličinu spremnika pomnožiti sa faktorom 1,2. Toplinski gubitci spremnika prema okolini su već obračunati u matematičkom modelu pa ih ne moramo posebno razmatrati.

### 9.1. Određivanje potrebne veličine dnevnog spremnika

Za određivanje potrebne veličine dnevnog spremnika upotrijebljeni su podatci dobiveni simulacijom opisanom u poglavlju 8.1. Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da je za neometan rad simulacije potreban toplinski spremnik koji omogućava pohranu 9201,99 kWh toplinske energije.

Uzimajući u obzir podatke iz poglavlja 5.1.1., gdje je izabran najbolji medij primarnog kruga, silikonsko ulje, sa svojim pripadajućim toplinskim kapacitetom od 2,1 kJ/kgK i gustoćom od 970 kg/m<sup>3</sup> te podatke o potrebnoj pohrani toplinske energije, potrebno je još samo navesti na kojem temperaturnom režimu radi toplinski spremnik. Određen je temperaturni režim od 380°C za temperaturu vruće grane i 60°C za temperaturu hladne grane. Ovako visoka temperatura hladne grane primarnog kruga uzeta da bi se osigurao nesmetani prijelaz topline s medija primarnog na medij sekundarnog kruga, dok je temperatura tople grane uzeta malo manja od maksimalne dozvoljene zbog neizbježnog hlađenja medija. Ovaj temperaturni režim daje temperaturnu razliku od 320°C s kojom se može ići u izračun potrebnog volumena toplinskog spremnika.

Iz svih navedenih podataka se prema jednadžbi 9.1.1 izračuna potrebna zapremnina toplinskog spremnika -  $V_{TS} = 60,99 \text{ m}^3$ . Taj volumen bi predstavljala kugla unutarnjeg promjera  $D_u = 4,89 \text{ m}$ .

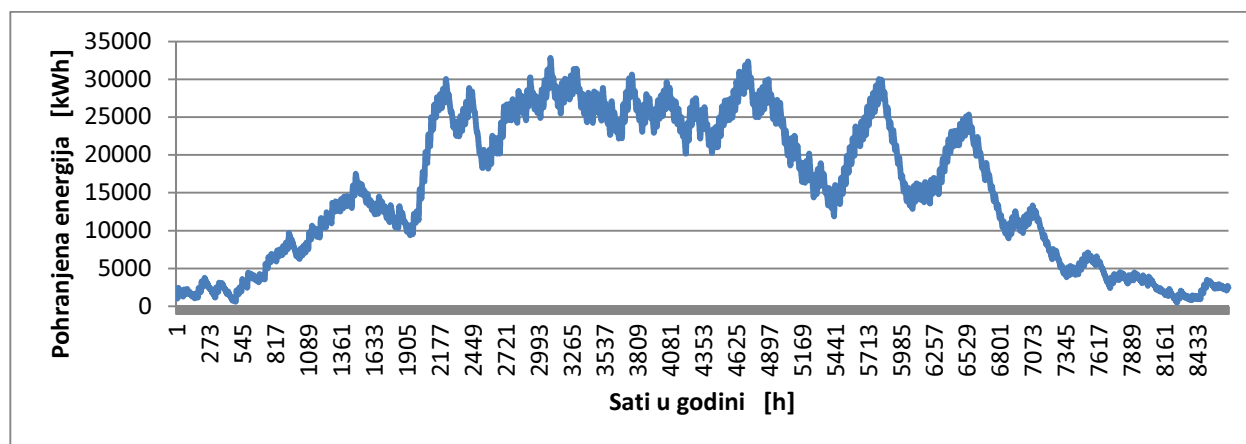
$$V_{TS} = 1,2 \times \frac{Q_{TS,max} \times 3600}{c \times \rho \times \Delta T} \quad (9.1.1)$$

Kada bi se isti proračun proveo na postrojenju koji iskorištava podatke kratkoročne prognoze došlo bi se do potrebne zapremnine od  $V_{TS,p} = 35,34 \text{ m}^3$  što bi stalo u kuglu unutarnjeg promjera  $D_u = 4,07 \text{ m}$ .

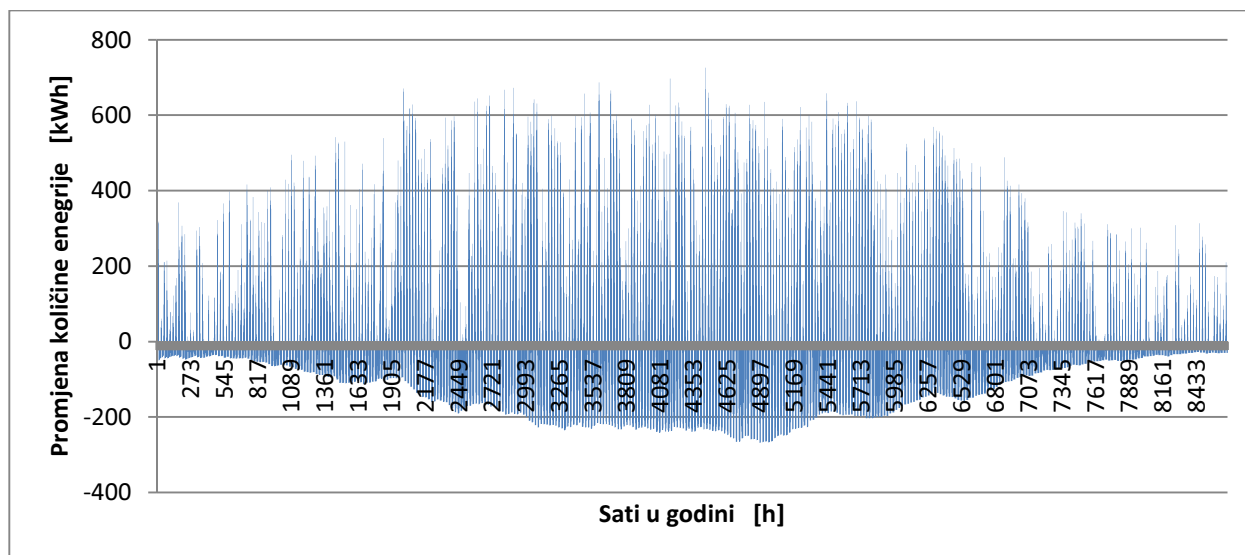
## 9.2. Tjedni spremnik

### 9.2.1. Određivanje potrebne veličine tjednog spremnika

Jednostavnom prilagodbom matematičkog modela može se doći do modela solarne elektrane s tjednim spremnikom. Jedina značajna izmjena u matematičkom modelu je promjena perioda za izračun prosjeka. Umjesto da se satni matematički model bazira na podacima iz tri dana, ovaj se matematički model bazira na podacima iz 21 dana, tj. tri tjedna te se proračun vrši na tjednom rasponu podataka umjesto na dnevnom. Time se postiglo da manju ulogu u proračunu imaju dnevne izmjene dana i noći i došlo je do automatske optimizacije cijelog matematičkog modela što se može vidjeti na idućim dijagramima.



**Slika 40. Pohranjena energija u TS za model s tjednim spremnikom**

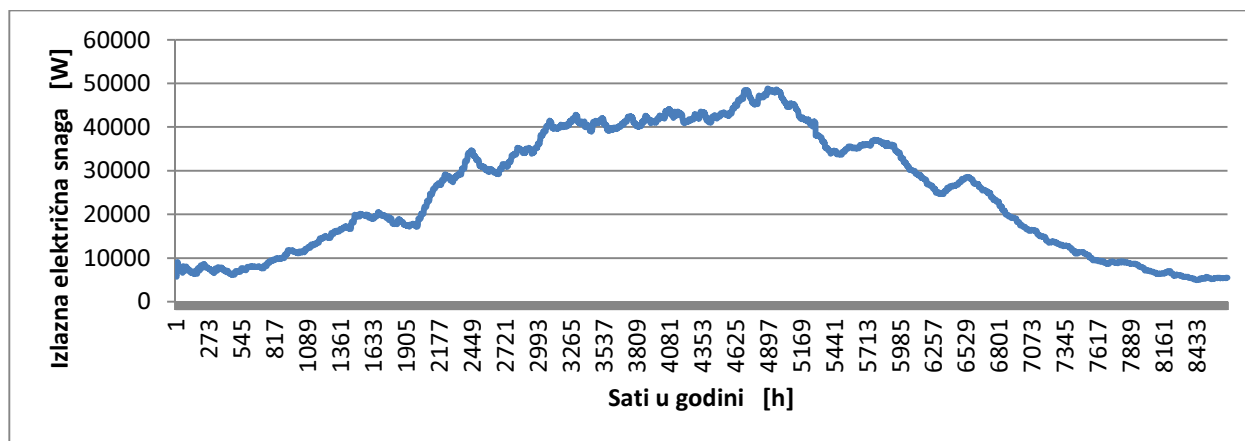


**Slika 41. Promjena količine energije u TS za model s tjednim spremnikom**

Na slici 40. se vidi kretanje pohranjene toplinske energije kroz godinu za izmijenjeni matematički model dok se na slici 41. vidi promjena količine energije u spremniku po satima. Na prvi pogled se vidi da bi za rad postrojenja koje bi radilo po ovome modelu bilo potrebno pohraniti puno više toplinske energije nego po originalnom modelu. Iz ovoga dijagrama se može očitati maksimum od  $Q_{TS,max,tjedni} = 32843,51$  kWh koliko iznosi i potrebni kapacitet tjednog toplinskog spremnika. Iz ovoga se, prema jednadžbi 9.1.1, dobije i potrebna volumenska zapremnina toplinskog spremnika koja iznosi  $V_{TS,tjedni} = 217,67$  m<sup>3</sup>, za što bi bio potreban spremnik oblika kugle unutarnjeg promjera  $D_u = 7,47$  m<sup>3</sup>.

### **9.2.1. Izlazna električna snaga za model s tjednim toplinskim spremnikom**

Osim što je matematički model postrojenja s tjednim spremnikom povećao gabarite potrebnog toplinskog spremnika potrebno je vidjeti kakav to utjecaj ima na izlaznu električnu snagu postrojenja.

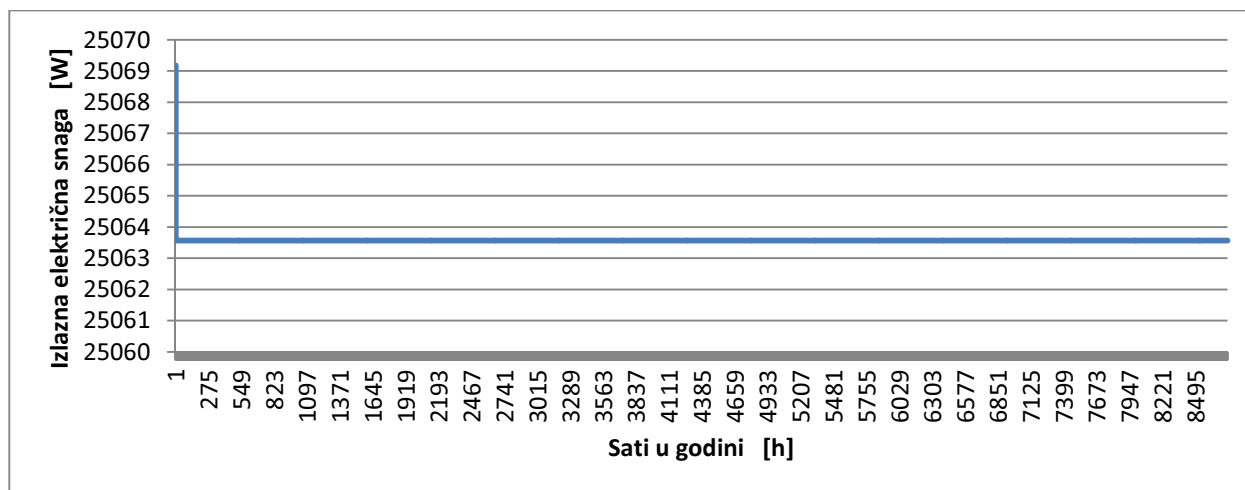


**Slika 42. Izlazna električna snaga postrojenja za model s tjednim TS**

Slika 42. pokazuje da povećanjem toplinskog spremnika se sve više izgladuje linija izlazne električne snage postrojenja, te se vidi da povećavanjem toplinskog spremnika solarna elektrana, po izlaznim karakteristikama, sve više približava klasičnim elektranama na fosilna goriva, tj. konstantom izvoru električne energije, čemu od početka i teži ovaj rad.

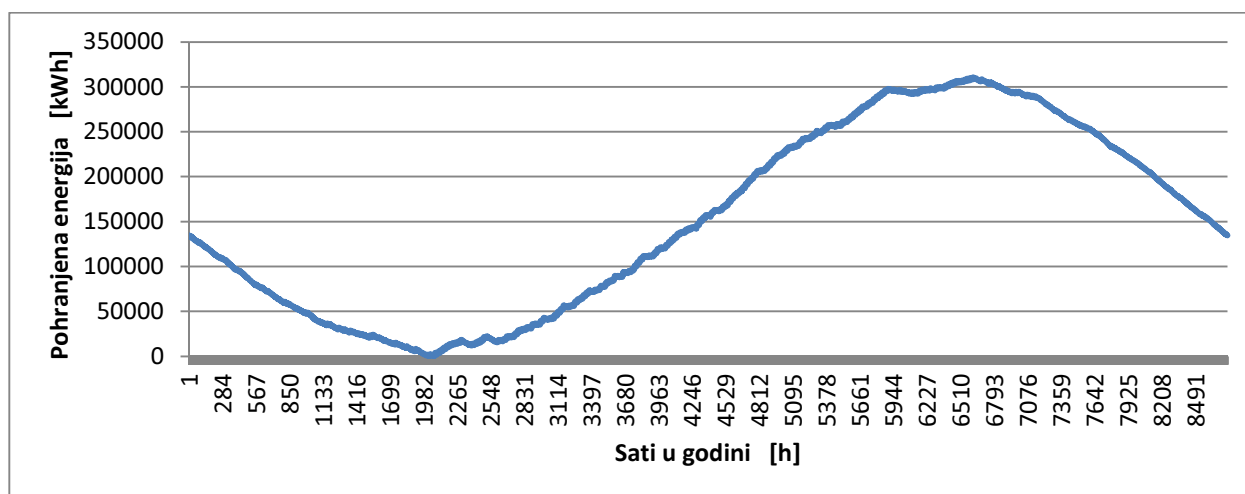
### 9.3. Sezonski spremnik

Sezonski, odnosno godišnji, spremnik je onaj spremnik koji omogućava solarnoj elektrani da postane konstantan izvor električne energije kroz godinu. Daljnjom intervencijom u matematički model i promjenom izračuna s tjedne na godišnju bazu te punjenjem spremnika potrebnom količinom energije za premošćivanje prvih par mjeseci dok je insolacija manja od prosječne godišnje ovo postrojenje postaje kontinuiran i konstantan izvor električne energije.



**Slika 43. Izlazna električna snaga postrojenja za model sa sezonskim TS**

Na slici 43. prikazan je konstantan iznos izlazne snage elektrane, dok slika 44. prikazuje količinu pohranjene toplinske energije koja je potrebna za održavanje konstantne izlazne snage.



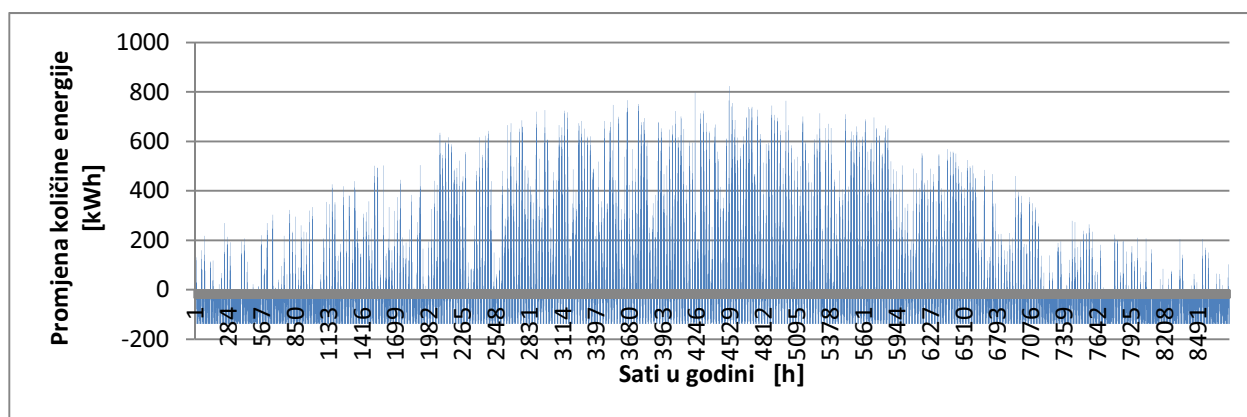
**Slika 44. Pohranjena toplinska energija u TS za model sa sezonskim spremnikom**

Da bi se postigao kontinuirani i konstantni iznos izlazne snage elektrane potrebno je prije pokretanja postrojenja napuniti toplinski spremnik s 120.879,127 kWh toplinske energije.



Maksimalna potrebna količina energije koju je potrebno pohraniti u toplinskom spremniku iznosi  $Q_{TS,max,sezonski} = 310705,16 \text{ kWh}$  što je vrlo veliki iznos. Za pohraniti tu količinu energije pomoću silikonskog ulja potreban je spremnik volumena  $V_{TS,sezonski} = 2059,17 \text{ m}^3$  što predstavlja kuglu unutarnjeg promjera  $D_u = 15,79 \text{ m}$ .

Dijagram punjenja/pražnjenja toplinskog spremnika kroz godinu, slika 45., predstavlja vezu između toplinskog spremnika i izlazne električne snage.



**Slika 45. Promjena količine energije u TS za model sa sezonskim spremnikom**

## 10. ZAKLJUČAK

Elektrane s obnovljivim izvorima energije predstavljaju glavni stup održivog napretka u energetici. Dok svjetske potrebe za energijom stalno rastu, sve stroži ekološki kriteriji onemogućavaju razvoj energetike putem kojim se do sada kretao. Osim zabrana koje nalažu međunarodne institucije, tu su i financijski poticaji koji okreću pogled investitora s klasičnih postrojenja na obnovljive elektrane. Makar elektrane s obnovljivim izvorima energije još uvijek nisu isplative kao klasične, zabrane i poticaji ih dovode u bolji ekonomski položaj što potiče njihov daljnji razvoj. Veći dio razvoja i istraživanja vezanim uz obnovljive izvore energije otpada na solarne elektrane.

Pod pojam solarne elektrane spada velika lepeza izvora energije od fotonaponskih modula, koji direktno pretvaraju vidljivi spektar sunčevog zračenja u električnu energiju, preko solarnih termoelektrana bez koncentracije sunčevog zračenja, pa do solarnih elektrana s koncentracijom sunčevog zračenja koje su danas najzanimljivije investitorima zbog najmanjih prostornih zahtjeva po kW instalirane snage, najveće energetske iskoristivosti, kapaciteta i ostalih tehničkih parametara. U ovome području svoj primat su izborile solarne toplinske elektrane s paraboličnim kolektorima zbog čega se i upravo i ovaj rad bazira na jednome takvom postrojenju.

Kod solarnih elektrana je izražen problem intermitentnosti sunčevog zračenja što ih onemogućava da konkuriraju klasičnim elektranama na fosilna goriva. Tome se pokušava doskočiti uporabom toplinskih spremnika u kojima se akumulira toplinska energija za pogon postrojenja prilikom nedostatka sunčeve insolacije. Najrasprostranjeniji način pohrane toplinske energije je akumuliranje zagrijanog medija koji služi i kao prijenosnik topline od kolektora do energetske blokove. U ovome radu kao najbolji izbor za medij za pohranu toplinske energije kod toplinske elektrane s paraboličnim kolektorima se predstavlja silikonsko ulje zbog svoje veće gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta. Ova fizikalna svojstva silikonskog ulja omogućavaju uštedu prilikom izgradnje postrojenja zbog manjih zahtjeva za volumenom toplinskog spremnika.

Zadatak, ali i sami izbor solarne termoelektrane s paraboličnim kolektorima i toplinskim spremnikom kao postrojenja na kojemu se bazira ovaj rad, nameće uporabu organskog Rankinovog ciklusa kao sustava za pretvorbu toplinske u mehaničku energiju. Zbog uporabe silikonskog ulja kao prijenosnika topline te njegove maksimalne temperature

kemijske stabilnosti od 400°C lako je zaključiti da temperatura organskog medija može biti samo niža. Uspoređujući temperaturu medija primarnog kruga i zadane temperature svježih pare od 250°C zaključeno je da se ove dvije vrijednosti međusobno ne isključuju te se na bazi njih može provesti izrada matematičkog modela i simulacija rada ovakvoga postrojenja kako je i zadano zadatkom.

Prije izrade matematičkog modela bilo je potrebno odrediti čemu se točno teži. Zadatak zadaje kontinuiranu proizvodnju električne energije, a u ovome radu se težilo i što konstantnijoj proizvodnji. Izvesti matematički model bilo čega što ima stohastičku prirodu nije laki zadatak pa tako nije bilo niti u ovome slučaju. Očekivani rezultati i dobiveni rezultati modela se donekle razlikuju budući da je model izvođen da bi postigao što konstantniju izlaznu snagu uz što manji potreban toplinski spremnik. Međutim, nastojanjem da se dodatno smanji, ili ograniči veličina, toplinskog spremnika dovodi do povećanja oscilacija izlazne snage i obrnuto, izravnavanje karakteristike izlazne snage dovodi do potrebe za povećanjem kapaciteta toplinskog spremnika. Stoga su se u ovome radu smatrali zadovoljavajućim dobiveni rezultati te dodatna optimizacija nije provedena.

Važno je uvidjeti da poznavanje i predviđanje buduće insolacije pozitivno utječe na smanjenje potrebne veličine toplinskog spremnika. Uporabom kratkotrajne prognoze vremena, koja je raspoloživa i najtočnija, u ovome modelu moguće je smanjiti volumen potrebnog toplinskog spremnika za preko 40%. Ovaj podatak pokazuje da je ovo ispravan put za optimizaciju veličine toplinskog spremnika.

Potrebno je bilo odrediti i medij sekundarnog kruga koji se koristio u simulacijama. Izbor organskog medija sekundarnog kruga nije tako jednostavan jer se ispostavilo da je sve medije koje se komercijalno upotrebljava moguće primijeniti pri zadanoj temperaturi svježih pare. Zbog toga je, u ovom slučaju, najbolje izbor medija izvršiti prema jednom od uobičajenih postupaka, a to je simuliranje uporabe više izabranih medija na matematičkom modelu postrojenja te odabir najboljeg prema najvećoj postignutoj efikasnosti procesa. Ovaj način osigurava da je upotrijebljeni medij i najpogodniji za razmatrano postrojenje.

Kada je dobiven matematički model za dnevni spremnik, nije teško prilagoditi ga i za druge namjene unutar istoga postrojenja, pa je tako ovdje upotrijebljen za određivanje veličina tjednog i sezonskog toplinskog spremnika. Toplinski spremnik se povećava da bi se imala veća zaliha akumulirane toplinske energije te da bi se moglo postići što

konstantniju izlaznu snagu postrojenja. Prilagodbom modela s dnevne na tjednu bazu dobio se model tjednog spremnika pri čemu se uvelike smanjuju oscilacije izlazne snage unutar kratkoročnog perioda, dok se prilagodbom na sezonski model oscilacije potpuno eliminiraju. U tablici 9. se mogu vidjeti dobivene potrebne veličine toplinskih spremnika.

**Tablica 9. Potrebne veličine toplinskih spremnika**

Spremnik	Potrebna veličina toplinskog spremnika [kWh]
Dnevni - s prognozom	5.332,64
Dnevni - bez prognoze	9.201,99
Tjedni	32.843,51
Sezonski	310.705,16

Iz tih podataka se jasno vidi da potrebna veličina dnevnog spremnika iznosi samo 28% tjednog ili samo 2,96% sezonskog. Uspoređujući fizičke dimenzije potrebnih spremnika za akumulaciju tolikih energija i uzimajući u obzir neizbježne gubitke kroz stjenke te potrebne debljine stjenki spremnika, može se zaključiti da su dimenzije dnevnog, a i tjednog spremnika još izvedive u praksi, dok je sezonski spremnik izvediv samo teoretski.

## VI. POPIS LITERATURE

1. Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A.: Renewable Energy: Technology , Economics and Environment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2007.
2. HELIOSCSP, [http://www.helioscsp.com/noticia.php?id\\_not=1401](http://www.helioscsp.com/noticia.php?id_not=1401), 29.07.2013.
3. Renewables Made In Germany, <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/start/solarthermische-kraftwerke.html>, 29.07.2013.
4. Figueredo, S. L.: Parabolic Trough Solar Collectors: Design for Increasing Efficiency, Massachusetts Institute of Technology, 2011. (Doktorski rad)
5. Pavlović, T.M., Radonjić, I.S., Milosavljević, D.D., Pantić, L.S.: A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Svezak 16, Izdanje 6 (2012): 3891–3902.
6. Lüpfert, E., Geyer, M., Schiel, W., Esteban, A., Osuna, R., Zarza, E., Nava, P.: EUROTROUGH DESIGN ISSUES AND PROTOTYPE TESTING AT PSA, Proceedings of Solar Forum 2001: Solar Energy: The Power to Choose, Washington, DC, 2001.
7. Quoilin, S.: Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications, Faculty of Applied Science of the University of Liège, Belgium, 2011. (Doktorski rad)
8. Facão, J., Palmero-Marrero, A., Oliveira, A.C.: Analysis of a solar assisted microcogeneration ORC system, International Journal of Low Carbon Technologies 3(4) (2008): 254-264.

9. Masheiti, S., Agnew, B., Walker, S.: An Evaluation of R134a and R245fa as the Working Fluid in an Organic Rankine Cycle Energized from a Low Temperature Geothermal Energy Source, *Journal of Energy and Power Engineering* 5 (2011): 392-402.
10. Angelino, G., Colonna di Paliano, P.: Multicomponent Working Fluids For Organic Rankine Cycles (ORCs), *Energy, Svezak 23, Izdanje 6* (1998): 449-463.